



**Kemian tekniikan korkeakoulu
Puunjalostustekniikan koulutusohjelma**

Rasmus Kiihamäki

**KONELAJITTELUN REJEKTIN KÄSITTELY
KARTONGINVALMISTUSPROSESSISSA**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 6.11.2014.**

Valvoja

Professori Jouni Paltakari

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Tuomo Sippus

Tekijä Rasmus Kiihamäki

Työn nimi Konelajittelun rejektin käsittely kartonginvalmistusprosessissa

Laitos Puunjalostustekniikan laitos

Professuuri Paperi- ja painatustekniikka

Professuurikoodi Puu-21

Työn valvoja Professori Jouni Paltakari

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) Diplomi-insinööri Tuomo Sippus

Päivämäärä 6.11.2014

Sivumäärä 106

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Työssä selvitettiin konelajittelun rejektin käsittelyyn liittyviä menetelmiä aallotuskartongin valmistusprosessissa. Kirjallisuusosassa tarkasteltiin lajitteluperiaatteita sekä lajitteluun soveltuvia laitteita. Kirjallisuustarkastelun tavoitteena oli selvittää parhaat tekniikat ja laitteet aallotuskartonkimassan puhdistamista ja rejektin hyötykäyttökohteita varten. Kirjallisuusosion perusteella painelajittimet soveltuvat puhdistuslajitteluun, varsinkin jos ne sisustetaan kiilalankarakosihdeillä ja siivekeroottoreilla. Lisäksi kirjallisuuskatsauksen perusteella kartonginvalmistukseen kelpaamaton kuitupitoinen rejekti tulisi hyödyntää polttoprosesseissa polttoaineena.

Työn kokeellisessa osassa tutkittiin Heinolan Flutingtehtaan kartonkikoneen lajittamoa, jossa tavoitteena oli selvittää nykyisten painelajittimien toiminta sekä löytää parempia laiteratkaisuja nykyisille sihdeille. Lisäksi, koeajojen tarkoituksena oli selvittää voidaanko Heinolan nykyistä rejektivirtaa lajitella uudelleen ja hyödyntää rejekti muulla tavoin kuin uudelleenkierrättämisellä. Tutkimuksessa jokaisen koepisteen sakeus, suotautumiskyky ja roskapitoisuus määritettiin laboratoriomittauksilla. Lisäksi, osalle koepisteistä suoritettiin Bauer-McNett fraktiointi laboratoriossa. Roskapitoisuudet määritettiin muokattua TAPPI T 213 standardia mukaillen.

Rejektisihdin koeajoissa ilmeni, että rejektisuhteen muutos ei vaikuttanut erottelutehokkuuteen. Sen sijaan sihtiä tulisi operoida korkeammalla rejektisuhteella, koska pienemmällä rejektisuhteella sihti osoitti tukkeutumisen oireita. Konesihtien koeajoissa ilmeni, että rakomalliset sihtikorit ovat huomattavasti tehokkaampia erottelemaan epäpuhtaudet kuin reikämalliset sihtikorit. Kolmannen lajitteluportaan koeajoissa ilmeni, että rejektivirta on mahdollista lajitella uudelleen ja sihtikorimalleista rakomallinen sihtikori osoittautui tehokkaimmaksi roskanpuhdistusvaihtoehdoksi.

Heinolan Flutingtehtaan kartonkikoneen lajittelua on mahdollista parantaa hyödyntämällä rakomallisia sihtikoreja lajittamon jokaisessa painelajittimessa. Lisäksi, kartonkikone hyötyisi kolmannen lajitteluportaan lisäyksestä, jolloin varsinaista rejektiä syntyisi erittäin vähän, jolloin rejekti on mahdollista poistaa kokonaan massakierrosta ilman suurempia kuituhäviöitä. Työssä keskityttiin selvittämään poistettavan rejektivirran loppukäyttökohde ja rejektin vaikutusta tehtaan muihin prosesseihin ainoastaan lyhyellä aikavälillä. Jatkossa poistettavan rejektivirran vaikutuksia tulisi selvittää pidemmällä aikavälillä. Lisäksi, kaikkien painelajittimien sihtikorien rakoleveydet on tarkistettava koeajojen muodossa jokaiselle lajittimelle erikseen. Tämän työn tulokista ilmenee 0,25 mm rakosihtikorin soveltuvan kolmannen lajitteluportaan painelajittimelle.

Avainsanat lajittelu, puhdistuslajittelu, painelajitin, rejekti, rejektin käsittely, reikäsihti, rakosihti, SC-fluting, aallotuskartonki, aaltopahvi,

Author Rasmus Kiihamäki		
Title of thesis Handling of approach flow reject in board production process		
Department Forest Products Technology		
Professorship Paper and Printing Technology Code of professorship Puu-21		
Thesis supervisor Professor Jouni Paltakari		
Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M.Sc. (Tech) Tuomo Sippus		
Date 6.11.2014	Number of pages 106	Language Finnish

Abstract

This thesis examined reject handling within the production of corrugated medium. The literature part explains screening and cleaning principles, as well as the suitable equipment for the processes. The aim of the literature review was to discover best techniques and equipment for the cleaning of corrugated medium pulp. Furthermore, the aim was to find a suitable recovery process for the reject. As a conclusion of the literature part, pressure screens are suitable for cleaning and sorting, especially if they are equipped with wedge-wire baskets and foil rotors. Also, the fiber rich reject, which is unsuitable for board production, should be used as a fuel in energy production.

In the experimental part the screening and cleaning processes of the board machine of Heinola Fluting Mill was studied. The goal of the experiments was to determine the current operation of the pressure screens, as well as to find solutions for improving the current screening solution. In addition, test runs were conducted to determine whether the current reject flow were re-sortable and use the reject in other processes than recirculation. In the study the consistency, freeness and trash contents of each experimental point was determined by laboratory measurements. In addition, for a part of the experimental points the Bauer-McNett fractionation was conducted in the laboratory. Trash contents were determined using a modified TAPPI T 213 standard.

The reject screen test run results show that changes in flow reject ratio does not cause any notable changes in trash contents. However, the test runs suggest that the reject screen should be operated at high levels of flow reject ratios, as the screen showed effects of initial clogging. The machine screen test run results show that the slotted baskets are considerably more effective to separate impurities, such as bark chips, sticks and aggregate, than the holed baskets. The third screening stage test run results show that the reject stream can be screened and that the slotted screen basket turned out to be the most effective option for cleaning the debris.

The screening and cleaning process of the Heinola Fluting Mill board machine can be improved by utilizing slotted screen baskets within every screen. In addition, the board machine would benefit from the addition of a third screening stage, while the amount of reject after the third stage is very low, whereby the reject can be removed completely without greater fiber losses. This work concentrated on researching the end-use of the reject stream and the impact of the reject removal to other processes in the plant only in short term. In the future, the removed reject stream impacts should be studied over a longer period of time. In addition, all pressure screen baskets slot widths must be checked for each of the screens by test runs. The results of this work shows that a slot width of 0.25 mm is applicable for the third screening stage pressure screen.

Keywords screening, cleaning, pressure screen, reject, reject handling, holed basket, slotted basket, SC-fluting, corrugated medium, corrugated board

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Stora Enso Oyj:n toimeksiannosta Heinolan Flutingtehtaalle.

Työn valvojana toimi professori Jouni Paltakari ja ohjaajana DI Tuomo Sippus. Heille haluan esittää parhaat kiitokseni hyvästä ja asiantuntevasta ohjauksesta työni aikana. Tuomolle haluan antaa erityiskiitokset eteenpäin ponnistavasta kannustuksesta.

Lisäksi tahdon kiittää koko Heinolan Flutingtehtaan kartonkitehtaan ja sellutehtaan sekä Efora Oy:n henkilökuntaa, niin toimihenkilöitä kuin työntekijöitä, heidän asiantuntevista kommentistaan ja ohjeistaan diplomityön kokeellisen osuuden suorittamiseksi. Ilman heitä koeajot olisivat monesti päättyneet ennenaikaisesti lajittimien tukoksiin tai muihin prosessiongelmiiin. Lisäksi Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksen väki on kiitoksensa ansainnut auttamisesta esikokeiden suorittamisessa.

Tahdon myös kiittää kohtalontoveriani, Iida Vertasta, hänen osoittamastaan vertaistuesta diplomityön suorittamisen aikaa. Myös vanhempani, veljeni ja koulutoverini, niin suomen- kuin ruotsinkieliset, ansaitsevat kiitoksensa heidän osoittamastaan tuesta koko opiskelujeni ajan.

Erityiskiitokset tahdon esittää rakkaalle kumppanilleni, Maddelle, hänen tuestaan, eteenpäin ponnistavasta asenteestaan sekä jaksamisestaan.

Heinolassa 6.11.2014

Rasmus Kiihamäki

SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat	1
Sisällysluettelo	2
Kirjallinen osa	6
1 Johdanto	6
1.1 Työn tausta	6
1.2 Työn tavoite ja suoritus	6
2 Aallotuskartonki	8
2.1 Yleistä	8
2.2 Aallotuskartongin tuoteanalyysi	9
2.3 Aallotuskartongin raaka-aineet	9
2.3.1 Puolikemiallinen massa	10
2.3.2 Kiertokuitumassa	12
3 Massan käsittely	14
3.1 Yleistä	14
3.2 Massan jauhatus	14
3.3 Massan lajittelu ja puhdistus	15
4 Lajittelu ja puhdistus	17
4.1 Yleistä	17
4.2 Tavoitteet	17
4.2.1 Puhdistusseulonta	18
4.2.2 Kuitufraktiointi	19
4.3 Laitteistot	20
4.3.1 Pyörrepuhdistin	20
4.3.2 Täryseula	22
4.3.3 Muut seularatkaisut	23
4.4 Taselaskenta	23
4.5 Yhteenveto	24

5	Painelajitin.....	26
5.1	Yleistä.....	26
5.2	Rakenne.....	27
5.2.1	Roottori.....	27
5.2.2	Sihtirummun aukot.....	30
5.2.3	Sihtirummun profiili.....	32
5.2.4	Syöttötapa.....	34
5.3	Rejektin sakeutuminen.....	35
5.4	Lajitteluun vaikuttavat tekijät.....	36
5.4.1	Rejektisuhde.....	37
5.4.2	Syöttösakeus.....	38
5.4.3	Roottorin nopeus.....	40
5.4.4	Lajitteluaukon koko ja avoin pinta-ala.....	41
5.4.5	Massan ominaisuudet.....	43
5.4.6	Kapasiteetti.....	44
5.5	Energiankulutus.....	45
5.6	Yhteenveto.....	46
6	Lajittamokytkennät.....	49
6.1	Rinnakkainkytkentä.....	49
6.2	Sarjakytkentä.....	50
6.3	Kaskadikykentä.....	51
6.4	Kytkentämallien eroavaisuudet.....	53
6.5	Kytkentöjen optimointi.....	53
7	Rejektin käsittely.....	55
7.1	Yleistä.....	55
7.2	Rejektinhallinta.....	55
7.3	Rejektin hyötykäyttö.....	56
7.3.1	Hyötykäyttö valmistusprosessissa.....	57

7.3.2	Hyötykäyttö polttoaineena	57
7.3.3	Muita käyttökohteita	60
7.4	Yhteenveto	61
8	Kirjallisen osan yhteenveto	62
	Kokeellinen osa.....	63
9	Johdanto	63
10	Prosessikuvaus	64
10.1	Nykyinen tilanne.....	64
10.2	Tutkimuskysymykset.....	65
11	Materiaalit ja menetelmät.....	66
11.1	Yleistä	66
11.2	Epäpuhtauksien mittaaminen	66
11.2.1	Online-mittaukset.....	66
11.2.2	Laboratoriomittaukset	67
11.2.3	Yhteenveto	67
11.3	Menetelmät	68
11.3.1	Tilavuusvirtaus.....	68
11.3.2	Sakeus	68
11.3.3	Suotautumiskyky.....	68
11.3.4	Roskapitoisuus	69
11.3.5	Kuitujakauma	69
12	Rejektin koostumus	70
12.1	Yleistä	70
12.2	Rejektin vaihtoehtoiset käyttökohteet.....	70
12.3	Muovipartikkelit ja niiden vaikutus Heinolan prosessissa.....	71
12.4	Tulokset.....	72
12.4.1	Sulatuskoeajot	72
12.4.2	Rejektin lämpöarvo	73

13	Lajitinkoeajot	75
13.1	Esikokeet.....	75
13.1.1	Lajitinsoveltuvuus.....	75
13.1.2	Tulokset.....	75
13.2	Tehdasmittakaavaiset kokeet	76
13.3	Koeajosuunnitelma	77
13.3.1	Rejektisihti	77
13.3.2	Konesihdit.....	77
13.3.3	Kolmas lajitteluvaihe	78
13.4	Tulokset.....	78
13.4.1	Rejektisihti	78
13.4.2	Konesihdit.....	81
13.4.3	Kolmas lajitteluvaihe	85
14	Vaihtoehtoiset prosessiratkaisut.....	90
14.1	Hyötykäyttö massanvalmistuksessa.....	90
14.2	Hyötykäyttö polttoaineena	90
14.2.1	Massa- ja vesitase.....	91
14.2.2	Tehtaan muut toiminnot.....	91
14.3	Muut käyttökohteet	92
14.4	Yhteenveto	92
15	Johtopäätökset ja suositukset	93
16	Kokeellisen osan yhteenveto.....	96
	Lähdeluettelo.....	98
	Liitteet.....	107

KIRJALLINEN OSA

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämä työ on suoritettu Stora Enso Oyj:n Heinolan Flutingtehtaalte, joka tuottaa puolike-miallista aallotuskartonkia. Heinolan Flutingtehtaan vuotuinen kapasiteetti on noin 300 000 tn. Tehdas käyttää pääraaka-aineenaan koivuhaketta, minkä lisäksi massan jouk-koon voidaan tarvittaessa lisätä aaltopahvitehtailta saatavaa kierrätyskuitua. Tehtaan päämarkkina-alueena ovat korkean kosteuden omaavien maiden hedelmä- ja vihannes-teollisuuteen toimittavat aaltopahvitehtaat.

Heinolan Flutingtehtaan kartonkikone on rakennettu 1960-luvulla, minkä jälkeen siihen on suoritettu parannusinvestointeja vuosien mittaan. Vuosien saatossa ovat aallotuskar-tonkilaadut keventyneet, mikä on aiheuttanut haasteita hallita kartongin valmistusta ja jalostusta. Lisäksi, keventyneen ja ohentuneen tuotteen takia ovat roskat ja muut epäpuh-taudet alkaneet näkyä yhä selvemmin poikkiradan pinnassa, mitkä on oletettu aiheuttavan katkoja kartonkikoneella ja sitä seuraavalla leikkurilla, minkä lisäksi eräät asiakasvalituk-set ovat liittyneet aaltopahvin painatusongelmiin.

1.2 Työn tavoite ja suoritus

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää kuinka lajittelu- ja puhdistusprosessit toimi-vat, mitkä asiat vaikuttavat lajitteluun ja millaisilla toimenpiteillä voidaan parantaa lajitte-lutehokkuutta. Erityisesti pyritään selvittämään kuinka laitteistovalinnoilla voidaan paran-taa lajitteluprosessin puhdistustulosta ilman, että prosessin käytöstä ilmenee muita haitta-vaikutuksia, kuten energian- ja vedenkäytön tai kuitutappioiden lisääntymistä.

Lisäksi työssä tullaan selvittämään mahdollisuuksia lajitteluprosessin rejektinhallintaan. Työn tarkoitusta mukaillen työssä ei paneuduta tarkemmin paperiteknisiin ominaisuuksiin, jotka muuttuvat lajittelun yhteydessä.

Diplomityö on jaettu kahteen osioon; kirjalliseen ja kokeelliseen osaan. Kirjallisessa osi-ossa käydään tarkemmin läpi mitä lajittelu- ja puhdistusprosessit paperin- ja kartongin-valmistuksessa tarkoittavat, minkälaisia laitteita on käytettävissä lajittelua varten sekä kuinka prosesseja voidaan hallita operointiparametrien ja laitteistovalintojen avulla. Li-

säksi, kirjallisessa osiossa tarkastellaan mitä lajitteluprosessien rejektillä voidaan tehdä ja mikä olisi rejektin optimaalisin loppukäyttökohde.

Kokeellisessa osiossa tutkitaan Heinolan Flutingtehtaan kartonkikoneen nykyisen lajittelujärjestelmän toimivuutta erilaisilla koeajoilla, millä pyritään saamaan selville voidaanko Heinolan Flutingtehtaan kartonkikoneen käyttämää massaa puhdistaa nykyistä tarkemmin, ilman että prosessin sivuvirtana syntyy liikaa kuitutappiota. Koeajohypoteesina on, että laitteisto- ja operointiparametreja muuttamalla saavutetaan parempi lopputulos. Paremman lopputuloksen etuja ovat puhtaampi massa, kartonkikoneen ajettavuusongelmien vähentyminen sekä rejektinhallinnan järkeistäminen.

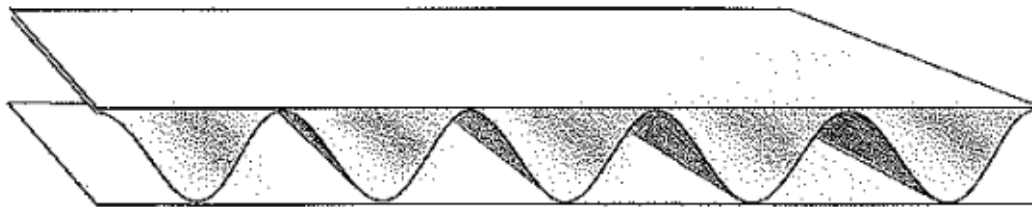
Edellä mainitun lisäksi kokeellisen osion osatavoitteena on selvittää rejektin soveltuvuus muihin tehtaalla sijaitseviin osaprosesseihin, kuten uudelleenkeitettäväksi tai polttoaineeksi höyryvoimalaitoksella. Kyseisten koeajojen hypoteesina on, että rejekti ei sovellu uudelleenkäytettäväksi, mutta sen sijaan se sisältää riittävän polttoarvon, mikä edesauttaa sen käyttämistä höyryvoimakattilan polttoaineena.

2 AALLOTUSKARTONKI

2.1 Yleistä

Aallotuskartonki, fluting, on erittäin laaja-alaisesti hyödynnetty raaka-aine kuitupohjaisissa laatikkorakenteissa, aaltopahveissa. Aallotuskartonki toimii aaltopahvirakenteessa välikerroksena, missä sen tärkeimpinä tehtävinä on tuoda lujuutta, jäykkyyttä ja kestävyyttä aaltopahvirakenteelle. Tunnuksenomaista aallotuskartongille on sen aaltomainen muoto yhden tai kahden pintakartongin, lainerin, välillä. Aaltomaisella muodolla pystytään vaikuttamaan aaltopahvirakenteen toimivuuteen jatkojalostusprosesseissa ja loppukäyttökohteissa. Aaltopahvin tärkeimpiä käyttökohteita ovat erityistä suojausta tarvitsevat elintarvikkeet ja tuotteet, jotka muutoin saattaisivat rikkoutua kuljetusten aikana. Tekniikan kehityksen myötä on aaltopahvia pyritty hyödyntämään myös kevyempien ja vähemmän suojaa vaativien tuotteiden pakkaamiseen. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 13-18; Hartikainen, 1998, s. 244-247)

Aaltopahvin rakenne on vaihdeltavissa, riippuen minkälaisen rakenteen aaltopahvin valmistaja haluaa luoda. Aaltopahvi luokitellaan neljään eri ryhmään; yksipuolinen, kaksipuolinen yksiaaltoinen, kaksipuolinen kaksiaaltoinen sekä kaksipuolinen kolmiaaltoinen aaltopahvi (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 14-15; Hartikainen, 1998, s. 244-245). Yksipuolisessa aaltopahvissa aallotuskartonki on yhdistetty ainoastaan yhteen pintakartongin. Kaksipuolisessa aaltopahvissa on aina kaksi pintakartongikerrosta ja välissä yksi aallotuskartongikerros. Useamman aallon omaavissa kartongeissa on pintakartongista valmistettu välikerros aallotuskartonkien välille. Useamman aallotuskerroksen hyödyntäminen aaltopahvirakenteessa parantaa pahvin lujuus-, jäykkyys- ja suojausominaisuuksia (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 15; Kiviranta, 2000, s. 64-65). Kuva 1 esittää kaksipuolisen yksiaaltoisen aaltopahvirakenteen (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 14).



Kuva 1. Kaksipuoleinen yksiaaltoinen aaltopahvi. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 14)

2.2 Aallotuskartongin tuoteanalyysi

Paperin- ja kartonginvalmistuksessa puhutaan tuotteen ajettavuus- ja lopputuoteominaisuuksista, jotka ovat usein toisistaan riippumattomia. Aallotuskartonkia käytetään pakkausten valmistuksessa, missä sen päätehtävänä on antaa aaltopahville jäykkyyttä. Lisäksi aallotuskartongin tarkoituksena on pitää pintakartongit, linerit, erillään toisistaan. Alla on lueteltuna aallotuskartongin tärkeimmät ominaisuudet: (Ek & Mäkeläinen, 1983, s. 529)

- Jäykkyys
- Pakkauslaatikon lujuusarvot
- Hyvä ajettavuus aaltopahvikoneella
- Hinta

Aaltopahvin tärkein tehtävä on suojata sen sisälle pakattavia tuotteita mahdollisimman hyvin. Lisäksi aaltopahvia hyödynnetään usein painavien ja särkymisherkkien tuotteiden suojauspakkaamiseen, minkä takia aaltopahvilta vaaditaan erityisesti lujuutta ja jäykkyyttä. Aaltopahvin lujuuteen ja jäykkyyteen vaikuttavat kaikki pahvinvalmistuksessa käytetyt materiaalit, joista aallotuskartongin rooli on keskeisin. Aallotuskartongin aaltomaisen muodon kestävyys aaltopahvirakenteessa vaatii aallotuskartongilta erityisen hyvää puristuslujuutta, sillä muutoin aaltopahvirakenne sortuisi jo aaltopahvin valmistusprosessissa. (Kiviranta, 2000, s. 65; Ek & Mäkeläinen, 1983, s. 529).

Hyvä ajettavuus aaltopahvikoneella saavutetaan ylläpitämällä aallotuskartongin valmistuksessa tasaista kosteusprofiilia, jäykkyyttä ja imukykyä. Aallotuskartongin tasainen kosteusprofiili ja imukyky ovat tärkeitä ominaisuuksia aaltopahvin valmistukseen liittyvissä aallotus- ja liimausprosesseissa. Väärässä kosteuspitoisuudessa aallotuskartonki murtuu aallotuksen yhteydessä ja liian tiivis tai huokoinen aallotuskartonki ei sovellu pintakartongin ja aallotuskartongin yhteen liimaamiseen. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 30; Ek & Mäkeläinen, 1983, s. 529).

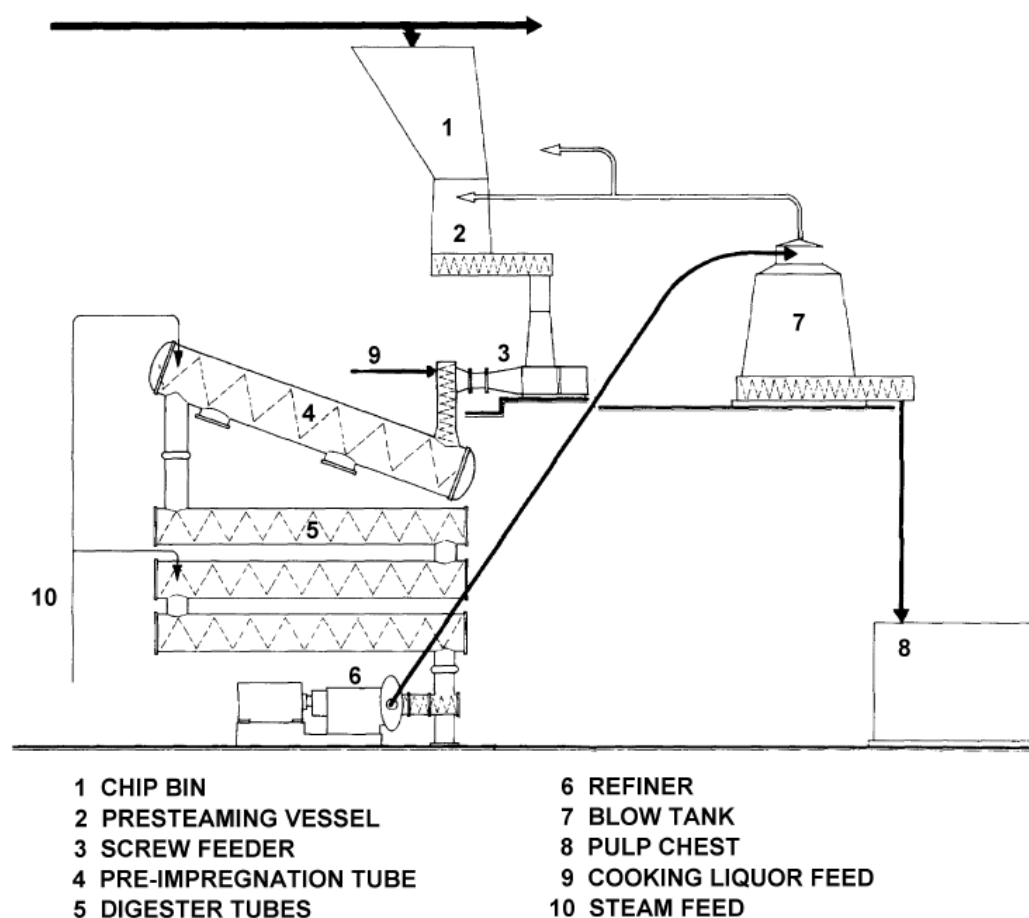
2.3 Aallotuskartongin raaka-aineet

Aallotuskartonkia valmistetaan sekä neitseellisestä että kierrätetystä kuidusta. Neitseellistä kuitumassaa kutsutaan puolikemialliseksi massaksi, josta valmistetaan puolikemiallista aallotuskartonkia, SC-flutingia. Kiertokuitumassasta valmistettua aallotuskartonkia kutsutaan Wellenstoffiksi. Neitseellisen kuidun osuus on noin 30 % ja kiertokuidun osuus 70 % aallotuskartongin tuotannosta. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 20)

2.3.1 Puolikemiallinen massa

Puolikemiallista massaa valmistetaan pääsääntöisesti lehtipuuhakkeesta, josta koivuhake soveltuu parhaiten aallotuskartongin valmistukseen. Aallotuskartongin jäykkyyssominaisuus on riippuvainen käytettävän puuaineksen kuitujen jäykkyydestä, joka on riippuvainen kuitujen hemiselluloosapitoisuudesta (Gustafsson, et al., 2011, s. 248). Lehtipuukuidut sisältävät huomattavasti enemmän hemiselluloosaa kuin havupuukuidut (Janes, 1992; Alén, 2000, s. 28-29). Koivukuidut sisältävät suhteellisesti enemmän hemiselluloosaa muihin lehtipuukuituihin nähden, mikä korostaa valmistettavan tuotteen jäykkyyssominaisuuksia (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 30). Myös haapaa, leppää ja vaneritehtaiden haketushylkyä on hyödynnetty lisäraaka-aineena keittoprosessissa. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25)

Puolikemiallinen massa valmistetaan keittämällä lehtipuuhaketta neutraalissa sulfiittiliuoksessa, josta nimitys NSSC, neutraalisulfiittimenetelmä (Neutral Sulphite Semi-Chemical), johtaa juurensa (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25). Hakkeen keittoaika on huomattavasti lyhyempi kuin sulfaattikeitossa, keittoajan ollessa viidestä minuutista tuntiin (Gustafsson, et al., 2011, s. 249), kun sulfaattikeitossa keittoaika vaihtelee kolmesta kahdeksaan tuntiin riippuen onko kyseessä eräkeitto tai jatkuva keitto (Gustafsson, et al., 2011, s. 278). Kuva 2 havainnollistaa NSSC-keittomenetelmän (Ek & Mäkeläinen, 1983, s. 515).



Kuva 2. NSSC-keittomenetelmä (Ek & Mäkeläinen, 1983, s. 515).

Kuorittu ja pesty hake syötetään hakesiiloon (1), jossa se esihöyrytetään (2) ennen syöttämistä ruuvisyöttimelle (3). Ruuvisyöttimen tarkoituksena on toimia painelukkona, ettei keittimen sisällä oleva paine pääse purkautumaan takaperin. Keittoliuoksen syöttö (9) tapahtuu ruuvisyöttimen jälkeen. Kyseisessä kuvassa on hyödynnetty esi-imeytysputkea (4), jossa hake esi-imeytetään keittoliuoksella. Muista keitinputkista (5) poiketen, esi-imeytysputkessa keitto tapahtuu nestefaasissa, kun taas muissa putkissa se on kaasumainen keittifaasi. Keittimen alaosassa on massanpurkaus (6), josta hake puhalletaan keitin-paineen avulla puhallustorniin (7). Kyseisessä kuvassa massa kuidutetaan samalla, kun se puretaan keittimestä (6). Keittynyt hake ohjataan puhallustornin pohjalta purkausruuvilla massakyyppiin (8). Keittimen lämpöä ja painetta ylläpidetään voimalaitokselta tulevan höyryn (10) avulla. (Gustafsson, et al., 2011, s. 249-250)

Neutraalisulfiittimenetelmän tavoitteena on ainoastaan pehmentää hakkeen kuituraken-
netta sen verran, että se pystytään kuiduttamaan mekaanisesti, jolloin lopputuotteelle
tärkeä hemiselluloosa ei katoa keitto- ja kuidutusprosessin aikana. Puolikemiallista keit-

toa kutsutaan myös suursaantokeitoksi, sillä keiton saanto on selvästi korkeampi kuin sulfaattikeitossa. NSSC-menetelmällä saanto on noin 80 % kokonaispuuaineksesta (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25; Gustafsson, et al., 2011, s. 250), mikä on huomattavasti korkeampi kuin sulfaattikeitossa, jossa puuaineksen saanto keittoprosessin jälkeen on noin 50 % puun kuivapainosta (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 24; Gustafsson, et al., 2011, s. 279). Saantojen välinen ero johtuu keittoliuoksen joukkoon liuenneesta puuaineksen määrästä, jota liukenee sulfaattikeitossa enemmän kuin NSSC-keitossa (Seppälä, et al., 2002, s. 73-83).

NSSC-keiton jälkeen kuidut erotetaan toisistaan mekaanisesti kuiduttamalla. Kuidutusvaiheen jälkeen massa pestään ja varastoidaan jauhatusvaihetta varten. Pesun tarkoituksena on puhdistaa kuitusulppu ylimääräisestä keittoliuoksesta sekä muista liuenneista aineista. Pesusuodos ohjataan kemikaalien talteenottolaitokselle, missä liuoksesta otetaan talteen kemikaaleja ja liuennut puuaines poltetaan soodakattilassa energiaksi. (Seppälä, et al., 2002, s. 73-74)

Puolikemiallinen massa aallotuskartongin valmistuksessa on pääsääntöisesti valkaisematon, koska aallotuskartongille ei aseteta ulkonäöllistä vaatimusta, minkä johdosta valkaisu prosessi on jätetty kokonaan pois massanvalmistuksesta. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25-26,30)

2.3.2 Kiertokuitumassa

Aallotuskartonkia voidaan myös valmistaa kierrätetystä kuitumateriaalista, mutta sen käyttö on rajoitettu elintarviketeknillisistä syistä (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25-26). Aaltopahvitehtaiden prosesseista kerättyä jalostehylkyä, ”clippings”, hyödynnetään ensikuitumassaa tuottavissa laitoksissa lisämassana, sillä se on standardien mukaan riittävän puhdasta sekä korkealuokkaista keräyskuitutavaraa. Muualla kuin jalostelinjoilla kerätty paperi ja pahvi luokitellaan epäpuhtaaksi, sillä keräyspisteissä ei pystytä valvomaan riittävän tehokkaasti kerättävän materiaalin puhtautta. Lisäksi erilaiset hygieniasäädökset vaikuttavat kiertokuitumateriaalin hyödyntämiseen. (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25-26)

Kiertokuitupohjaista aallotuskartonkia hyödynnetään ratkaisuisissa, joissa aaltopahvilta ei vaadita yhtä hyvää kosteuskestävyyttä tai elintarvikekelpoisuutta kuin ensikuitupohjaiselta aallotuskartongilta. Vaikkakin kiertokuitumassasta valmistettu aaltopahvi on kosteuskestävyydeltään heikko, on sen hyödyntämisestä etuja tilanteissa, joissa materiaali ei saisi muuntua liikaa kosteuden lievästä muutoksesta. Valmistuksen jälkeinen käpertymi-

nen ja muu vastaavanlainen käyttäytyminen on huomattavasti vähempää kiertokuidusta valmistetuilla aaltopahvituotteilla. (Mäkinen, 2014)

Kemiallisen massan kiertokuidut ovat huomattavasti heikompia lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiltaan kuin ensiökuidut (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 29-30). Sen sijaan mekaanisten massojen osalta on pystytty todentamaan, että kyseisten massojen kierrättäminen parantaa siitä valmistettavan lopputuotteen laatua (Ackermann, et al., 2000, s. 359). Edellä mainittu ilmiö johtuu kuitujen sarveistumisesta. Sarveistumisella tarkoitetaan kuidun sitoutumiskyvyn heikentymistä, joka johtuu kuitujen solujen kutistumisesta, jolloin kuidut eivät kastuessaan uudelleen turpoa yhtä voimakkaasti kuin aiemmin (Ackermann, et al., 2000, s. 359-360). Muutokset vaikuttavat etenkin vetysidoksien muodostumiseen kuidun sisällä, jolloin kuiduista tulee vettä hylkiviä, mikä vähentää kuidun sitoutumiskykyä (Ackermann, et al., 2000, s. 360). Mekaanisten massojen paremman kierrätettävyyden oletetaan johtuvan mekaanisten massojen ligniini- ja hemiselluloosapitoisuuksista (Ackermann, et al., 2000, s. 363).

Kierrätyskuitumassan valmistus perustuu kierrätetyn paperin, kartongin ja aaltopahvin pulpperointiin, jonka aikana kiertokuitumateriaalin rakenne hajotetaan kuitusulpuksi. Kiertokuitusulppu sisältää kuitujen lisäksi huomattavan paljon epäpuhtauksia, kuten liimajäänteitä, vahvikenauhoja, painatusvärejä, jne. Nämä epäpuhtaudet ovat muodostuneet kierrätettyyn tuotteeseen sen jatkojalostusprosessissa ja loppukäytön aikana. Kuitusulppu on puhdistettava lajittelu- ja siistausprosessien avulla ennen kuin se kelpaa hyödynnettäväksi paperi- tai kartonkikoneella. Valkaisemattomat paperi- ja kartonkilajikkeet eivät oletusarvoisesti tarvitse yhtä paljon puhdistusta kuin valkaistut lajikkeet. (Seppälä, et al., 2002, s. 68-72)

3 MASSAN KÄSITTELY

3.1 Yleistä

Valmiiksi keitetty sellu käy monivaiheisen prosessin läpi ennen kuin se kelpaa käytettäväksi paperi- ja kartonkikoneille. Monivaiheista prosessia nimitetään massankäsittelyksi, jossa korkean sakeuden omaava kuitusulppu muovataan paperi- ja kartonkikoneen perälaatikolle soveltuvaksi matalasakeusmassaksi. Massankäsittelyn tavoitteena on parantaa paperi- ja kartonkikoneiden ajettavuutta, vähentää hylkyä ja päästöjä, tuottaa tasalaatuisempaa massaa ja lopputuotetta sekä minimoida kemikaalien, höyryn ja energian kulutusta (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108-111). Lisäksi massankäsittelyn tulee toimia katkoitta ja ilman ylimääräisiä prosessissa ilmeneviä painepulsseja (Dewan, 1992).

Valmiiksi keittynyt massa ohjataan keiton jälkeen massan pesuun, jossa tarkoituksena on pestä massasta keittoliemi sekä liuennut puuaines pois (Seppälä, et al., 2002, s. 101). Pesun yhteyteen voidaan liittää massan valkaisu prosessi riippuen tuotettavasta massalaadusta (Seppälä, et al., 2002, s. 101). Pesun ja valkaisun jälkeen massan ominaisuuksia parannetaan jauhamalla massaa, luoden kuiduille enemmän tarttumispintaa ja muodostamaan hienoaainesta, joka edesauttaa vahvemman ja tasalaatuisemman kuiturakenteen muodostumista rainausvaiheessa paperi- ja kartonkikoneilla (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 107). Lisäksi massassa on paljon epäpuhtauksia, joista on päästävä eroon ennen varsinaista paperin- tai kartonginmuodostusprosessia. Epäpuhtauksien poistamista hallitaan erilaisten lajittelu- ja puhdistusmenetelmien avulla (Seppälä, et al., 2002, s. 110). Aallotuskartongin valmistuksessa käytettävää massaa ei valkaista, joten kyseinen osaprosessi on jätetty pois massanvalmistuksesta.

Edellä mainittujen osaprosessien lisäksi paperikoneen kiertovesijärjestelmä tavataan laskea osaksi massankäsittelyä, sillä kiertovettä käytetään kuitusulpun laimentamiseen eri osaprosesseissa (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 107, 120-121). Lisäksi kiertovesijärjestelmästä pyritään ottamaan talteen nollakuituja, joita päätyy kiertovesijärjestelmään viiralta suotautuvan vedenpoiston yhteydessä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 120-121)

3.2 Massan jauhatus

Valmiiksi keitetty ja pesty massa ei sovellu sellaisenaan paperi- ja kartonginvalmistukseen, vaan massan ominaisuuksia on parannettava, jotta vaaditut laatuominaisuudet saavutetaan valmiille tuotteelle (Stevens, 1992, s. 187). Kuitujen sitoutumisominaisuuksia ja paperin laatuominaisuuksia kehitetään jauhamalla massaa jauhimilla (Stevens, 1992, s.

187). Jauhin varustetaan kahdella vastakkain asetetuilla levyillä, jotka ovat joko tasaterin tai kartioterin varustettuja, tavoitelluista kuidunominaisuuksista riippuen (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 111). Kartioterien etuna on pidentynyt jauhamisaika sekä suuri jauhamispinta-ala (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 111). Massasulppu pumpataan pyörivien terälevyjen läpi, jolloin massassa olevat kuidut hienontuvat ja fibrilloituvat (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108).

Kuidun fibrillaatio, joka on joko sisäistä tai ulkoista, kuvaa kuidussa tapahtuvaa kuiturakenteen murtumista. Fibrilloituessaan kuidun primääriseinäjä ja ulompi sisäseinämä poistetaan, minkä jälkeen sisempi sisäseinämän rakenne halkeilee ja muodostaa eri suuntiin osoittavia kuitufibrillejä (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108; Stevens, 1992, s. 188-189). Sisäinen fibrillaatio parantaa kuidun joustavuutta ja sitoutumiskykyä (Stevens, 1992, s. 188-189; Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108-109). Ulkoinen fibrillaatio kuvaa kuidun delaminoitumista, jolloin kuidusta irtautuu kuitufibrillejä, jotka lisäävät kuidun tarttumispinta-alaa (Stevens, 1992, s. 188-189). Lisäksi jauhatuksessa muodostuu hienoaainesta ja kuidut lyhentyvät (Stevens, 1992, s. 188-189).

Fibrillaatio parantaa paperin ja kartongin lujuusominaisuuksia, sillä jauhetut kuidut sitoutuvat paljon paremmin kuin jauhamattomat kuidut (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108-109). Myös hienoaaine parantaa paperin ja kartongin ominaisuuksia, etenkin optiset ominaisuudet paranevat, sillä hienoaaine edistää kuitusidosten muodostumista sekä täyttää kuituverkoston tyhjät kohdat, muodostaen näin tasalaatuisen kuituverkon (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108-109).

Aallotuskartongin jäykkyysominaisuuksia hallitaan keittovaiheen saannon ja jauhatusvaiheen avulla. Liian korkea saanto vaikeuttaa massan jauhatusta, mikä johtaa heikentyneisiin lujuusarvoihin. Eräissä tilanteissa keittosaannon lisäys vaikuttaa positiivisesti jäykkyysarvoihin, mutta tällöin aallotuskartonki on arka murtumiselle aallotusvaiheessa. Liian alhainen saanto sen sijaan aiheuttaa liiallista massan jauhamista, mikä tiivistää aallotuskartongin rakennetta vaikeuttaen aaltopahvin liimausprosessia. (Ek & Mäkeläinen, 1983, s. 529)

3.3 Massan lajittelu ja puhdistus

Massanvalmistuksessa lajitteluprosesseja on useita, alkaen hakepalasten lajittelusta päättyen valmiin massan puhdistusprosesseihin (Seppälä, et al., 2002, s. 110). Eräs tutkimus osoitti, että aikaisessa vaiheessa suoritettu lajittelu parantaa koko prosessin toimintahakkuutta ja vähentää tarvittavien lajittelu- ja puhdistusvaiheiden määrää myöhemmissä

prosessivaiheissa (Clark, 1983). Clark (1983) esittää, että pelkästään optimoimalla hakepalan koko ennen keittoprosessia voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä.

Lajittelu- ja puhdistusvaihe voidaan toteuttaa ennen edellä mainittuja prosessivaiheita, jolloin puhutaan massan esilajittelusta (Bliss, 1992b s. 229). Lajittelu ennen jauhamisvaihetta pyrkii erottamaan eripituiset kuidut eri massavirtoihin, jolloin eripituisille kuitusulppuvirrat voidaan jauhaa eri pituudenmukaisilla ominaissärmäkuormilla, mikä parantaa lopullisen massan laatua (Seppälä, et al., 2002, s. 110; Häggblom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 108-111). Puhdistusvaiheessa massasta poistetaan kaikkein pienimmät ja kevyimmät epäpuhtauspartikkelit, kuten muovit, erilaiset polymeerirakenteet ja hiekanjyvät. Kyseiset pienikokoiset partikkelit ovat omiaan aiheuttamaan ratakatkoja ja prosessin hallintaongelmia paperi- ja kartonkikoneilla (Seppälä, et al., 2002, s. 111).

Lajittelu- ja puhdistusvaiheen tarkoituksena on erottaa massasta epäpuhtaudet, joita löytyy raaka-aineista tai syntyy massan sekaan valmistusprosessin aikana. Nykyisin lajittelua käytetään yhä enenevässä määrässä massavirran jakamiseen joko kuidunpituuden tai tiheyden mukaan, riippuen käytettävästä prosessilaitteistosta (Abubakr, et al., 1995). Menetelmää kutsutaan fraktioimiseksi, jossa massa jaetaan eri kuitufraktioihin (Abubakr, et al., 1995).

Aallotuskartongin käyttökohteesta johtuen aallotuskartongin valmistukseen soveltuva massa ei tarvitse laajempaa lajittelua tai puhdistusta. Aallotuskartongin tärkeimmät ominaisuudet ovat jäykkyys ja hyvä ajettavuus, jolloin epäpuhtauksien sisältyminen massassa ei ole ongelma, koska epäpuhtaudet vaikuttavat enimmäkseen kartongin ulkonäköön. Aallotuskartongin valmistuksessa on tästä johtuen hyvin tyypillisesti varsin yksinkertainen lajitteluvaihe, jossa tavoitteena on ainoastaan estää suurempien epäpuhtauksien päätyminen kartonkikoneen perälaatikkoon ja viiraosalle, missä ne saattavat rikkoa herkkiä prosessilaitteita.

4 LAJITTELU JA PUHDISTUS

4.1 Yleistä

Lajittelun tarkoituksena on jakaa yksi massavirta kahteen erilliseen virtaan, joita voidaan hyödyntää eri tavoin (Gallagher, 1997, s. 26). Lajittelun tavoitteena on puhdistaa massavirrasta erilaiset epäpuhtaudet kuten tikut, kuituflokkit, pigmenttijäämät, hiekka sekä muut paperinvalmistukseen kelpaamattomat partikkelit (Bliss, 1992b, s.229-230). Massaa puhdistamalla koneella aiheutuvat katkot vähenevät ja lopputuotteen laatu paranee huomattavasti. Lisäksi suurikokoiset epäpuhtaudet, kuten kyypeistä irti lähtevät kaakelinpalaset, betonijäämät sekä muut karkeat ja kovat palaset aiheuttavat paperikoneen ja sen laitteiden mekaanista kulumista (Seppälä, et al., 2002, s. 110-111). Mekaaninen kuluminen vähentää laitteiden käyttöikää ja saattaa vaurioittaa kalliita osia, kuten viiroja (Seppälä, et al., 2002, s. 110-111).

4.2 Tavoitteet

Kuten edellä mainittiin, lajittelun tarkoituksena on jakaa yksi massavirta kahteen erilliseen virtaan. Yleisesti käytössä olevien tekniikoiden avulla massavirran lajittelu tapahtuu joko kuidunpituuden tai kuitujen ominaispinta-alan mukaan (Bliss, 1992b, s. 229; Bliss, 1992a, s. 248). Painelajittimet soveltuvat kuidunpituuden mukaiseen lajitteluun, kun taas pyörrepuhdistimet soveltuvat kuitujen ominaispinta-alan mukaiseen lajitteluun (Weise, et al., 2000, s. 146-149).

Nelson (1981) kehitti aikanaan oman suhdeluvun arvioimaan lajittelun selektiivisyyttä, joka tunnetaan nimellä Nelsonin suhdeluku. Suhdeluvun tarkoituksena on indeksoida laskennallisesti prosessiparametrin muutoksen vaikutus lajittelutulokseen (Nelson, 1981). Suhdeluvulla pystytään myös arvioimaan lajittimen toimintaa aikajakson ylitse, jolloin voidaan havaita mahdollisia vikoja laitteen toiminnassa verrattain yksinkertaisella laskennalla (Nguyen, et al., 1991; Nelson, 1981). Yhtälö 1 esittää Nelsonin suhdeluvun (Nelson, 1981),

$$Q = \frac{E_c}{(E_c + R_w - E_c \times R_w)} = \frac{E_c}{E_r} \quad (1)$$

missä	E_c	on puhtaustehokkuus (%),
	R_w	on massarejektisuhde (%) ja
	E_r	on epäpuhtauksien poistotehokkuus (%).

Nelsonin kaava supisuu myös yksinkertaisempaan muotoon, jolloin laskentaa varten riittää epäpuhtauksien määrien tunteminen rejekti- ja akseptivirrassa. Yhtälö 2 esittää Nelsonin suhdeluvun yksinkertaisemmassa muodossa (Nelson, 1981),

$$Q = \frac{(S_r - S_a)}{S_r} \quad (2)$$

missä S_r rejektikomponentin määrä rejektivirrassa (%) ja
 S_a rejektikomponentin määrä akseptivirrassa (%).

Nelsonin suhdeluvun yksinkertaisuus korostuu tilanteissa, joissa halutaan optimoida erään lajittimen toimintaa muutamalla lajitteluun vaikuttavia tekijöitä. Nguyen et al. (1991) osoittivat omassa tutkimuksessaan kuinka erään lajittelujärjestelmän toimintaa kyettiin parantamaan seuraamalla Nelsonin suhdelukua. Kyseisen lajitinjärjestelmän ongelmakohtaksi osoittautui lajiteltavan massan syöttösakeus, jolloin järjestelmän toimivuus voitiin optimoida massan syöttösakeutta muuttamalla. Käytännössä Nelsonin suhdeluvun hyödyntäminen helpottaa lajittimen toiminnan seuraamista pidemmällä aikavälillä.

4.2.1 Puhdistusseulonta

Puhdistusseulonnassa pyritään poistamaan epäpuhtauksia massavirtauksesta joko käyttämällä painelajitinta, pyörrepuhdistinta, näiden kombinaatioita tai jotain muuta erottelulajitteluun soveltuvaa tekniikkaa (Tervola, et al., 2011, s. 438). Puhdistusseulonnan tärkein tehtävä on puhdistaa massavirta mahdollisimman tehokkaasti minimoiden kuituhäviöt (Krotscheck, 2006, s. 561). Kuituhäviöllä tarkoitetaan sitoutumiskykyisten kuitujen ja hienoaineksen päätymistä rejektiin (Krotscheck, 2006, s. 595). Puhdistusseulonnan toissijainen tehtävä paperinvalmistusprosesseissa on suojata perälaatikkoa ja viiroja karkeamilta epäpuhtauksilta, jotka voisivat prosessiin tullessaan aiheuttaa laitteistojen rikkoutumista tai katkoja koneella (Hautala, et al., 2009, s. 284; Weise, et al., 2000, s. 148).

Lajittimen puhdistustehokkuus lasketaan yhtälöllä 3 (Hautala, et al., 2009, s. 298).

$$E_C = \frac{X_F - X_A}{X_F} \quad (3)$$

missä X_F rejektikomponentin määrä syöttövirrassa (%) ja
 X_A rejektikomponentin määrä akseptivirrassa (%).

Puhdistusseulonnan tehokkuus riippuu pitkälti epäpuhtauksien partikkelikoosta ja -dimensioista, sillä lajittimet kykenevät lajittelemaan massavirran kahteen eri jakeeseen

riippuen kuidunpituudesta ja -leveydestä (Julien Saint Amand & Perrin, 2001). Suuret kokoerot partikkeleiden välillä helpottavat lajittelua, kun taas pienet erot johtavat sekalaisiin tuloksiin (Julien Saint Amand & Perrin, 2001). Tästä syystä puhdistuslajittelua nähdään joko esteseulontana tai todennäköisyysseulontana (Gallagher, 1997, s. 14-15).

Esteseulonnalla tarkoitetaan, että partikkelin pääsy akseptiin estetään pienentämällä sihtiaukon kokoa riittävästi, ettei yksikään partikkelin dimensioista ole pienempi kuin sihtiaukon koko, jolloin partikkeli seuloutuu väistämättä rejektivirtaan (Gallagher, 1997, s. 15). Todennäköisyysseulonnalla, jota massan lajittelu suurimmaksi osaksi on, tarkoitetaan partikkeleiden seulonnan perustuvan todennäköisyyteen tulla poisseulotuksi (Gallagher, 1997, s. 28). Todennäköisyysseulonnassa sihtiaukon koko on suurempi kuin yksi partikkelin kolmesta dimensioista, jolloin partikkelilla on mahdollisuus läpäistä sihti ja päätyä akseptiin (Hautala, et al., 2009, s. 287-288). Kuidut ovat pääasiassa pituussunnastaan suurempia kuin sihdin läpäisevien aukkojen koot, jolloin riittää, että kuitu orientoituu sihtipinnan aukon suuntaisesti, jotta se läpäisee sihdin (Gallagher, 1997, s. 16).

Pienentämällä reikien kokoa tai rakojen leveyttä voidaan edistää pitkien kuitujen poisseulontaa, jolloin selvästi pidemmät kuidut päätyvät mitä todennäköisimmin rejektiin. Silti pitkiä kuituja havaitaan myös akseptivirrassa, koska lajittelu on pitkälti todennäköisyyteen perustuva, jolloin erottelutarkkuus ei ole täysin absoluuttista. Myös massan kuitujakauma vaikuttaa erottelutehokkuuteen. (Julien Saint Amand & Perrin, 2001)

4.2.2 Kuitufraktiointi

Kuitufraktioinnin tarkoituksena on jakaa massavirtaus joko kuidunpituuden tai kuitujen karkeuden mukaan, jotta saataisiin eri ominaisuuksilla olevat massajakeet jatkojalostettua sopivampaan muotoon (Abubakr, et al., 1995; Atkins, et al., 2005; Braaten & Wakelin, 1999; Corson, et al., 1996; Corson, et al., 1997). Kuitufraktioinnin merkitys on kasvanut huomattavasti viimeisten vuosikymmenten aikana, sillä kuiduista pyritään saamaan yhä enemmän hyötyjä irti (Moller, et al., 1979).

Pitkien ja karkeiden kuitujen sitoutumis- ja lujuusominaisuudet eivät ole vielä paperinvalmistukseen soveltuvalla tasolla, jolloin kyseiset kuitujakeet tarvitsevat erillistä jauhamista, missä kuituja jauhetaan jauhinlevyjen välillä (Corson, et al., 1997; Hammar & Ottestam, 2001; Karnis, 1997). Jauhamisella pyritään lisäämään kuitujen sitoutumispiintaa, mikä edistää kuiduista muodostetun paperirainan lujuusominaisuuksia. Saavutetut kustannushyödyt kyseisestä käsittelystä ovat merkittävät (Abubakr, et al., 1995; Corson, et al., 1996; Hammar & Ottestam, 2001; Karnis, 1997; Yu, et al., 1994).

Hyödyntämällä erilaisia kuitufraktioita paperin- tai kartongintekijä voi saavuttaa merkittäviä hyötyjä valmistusprosessissa, missä erilaiset kuitufraktiot vaikuttavat lopputuotteiden laatuun (Abubakr, et al., 1995; Allison & Olson, 2000; Braaten & Wakelin, 1999). Esimerkiksi, taivekartongin valmistaja voi hyödyntää pitkää kuitua sisältävää massaa taivekartongin keskimmaisessä kerroksessa riittävän lujuuden ja tukevuuden aikaansaamiseksi ja lyhyttä kuitua sisältävää massaa pintakerroksissa taivekartongin optisten - ja painettavuusominaisuuksien parantamiseksi (Corson, et al., 1996; Corson, et al., 1997).

Riippuen prosessista ja käytetystä laitteistosta kuitufraktiointi tapahtuu joko kuidunpituuden tai sen leveyden mukaisesti (Braaten & Wakelin, 1999; Hammar & Ottestam, 2001). Painelajittimet ovat omiaan lajittelemaan massavirta kuidunpituuden suhteen, jolloin erimittaiset kuidut ajautuvat eri jakeisiin (Braaten & Wakelin, 1999; Corson, et al., 1996; Kaminski, 1997). Fraktiointiin vaikuttavat tekijät voidaan luokitella mekaanisiin ominaisuuksiin ja prosessiolosuhteisiin. Mekaaniset ominaisuudet liittyvät painelajittimen rakenteeseen ja prosessiolosuhteet liittyvät painelajittimen ajotapaan (Yu, et al., 1994). Myös pyörrepuhdistimia pystytään hyödyntämään fraktioinnin välineinä, vaikka niiden alkupeäinen tarkoitus oli toimia massavirran puhdistimina (Hammar & Ottestam, 2001).

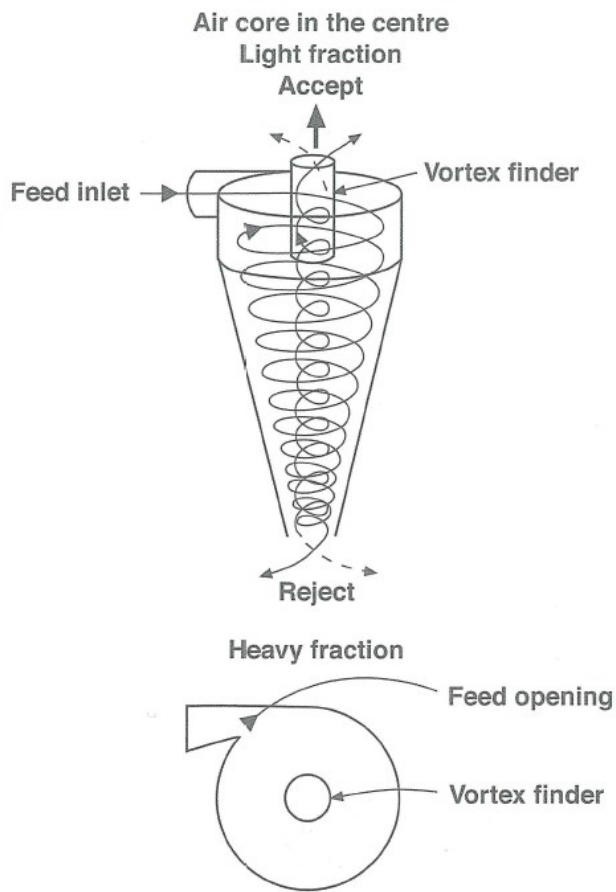
4.3 Laitteistot

Massan lajittelua ja puhdistusta varten on käytettävissä painelajittimia, pyörrepuhdistimia, täryseuloja sekä muita seuloja hyödyntäviä ratkaisuja. Mainituista vaihtoehtoista painelajittimet ja pyörrepuhdistimet ovat yleisimmin käytössä, koska kyseisillä laitteilla on hyvä erottelutehokkuus, minkä lisäksi riippuen käyttökohteestaan ne soveltuvat prosesseihin eri tavoin ja eri vaatimuksin (Weise, et al., 2000, s. 146). Painelajitin käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.

4.3.1 Pyörrepuhdistin

Pyörrepuhdistin koostuu kartiomaisesta syklonista, johon massaa syötetään syklonin tangentin suuntaisesti, mikä saadaan aikaan lajittelua varten vaadittu pyörreliike. Syklonin sisällä vallitsee kaksi pyörrettä; syklonin ulkokehällä on keskipakoisvoiman aiheuttama ulospäin ohjaava pyörre ja syklonin keskustassa on päinvastainen sisäänpäin ohjautuva pyörre. Pyörteiden vaikutuksesta massa kulkeutuu syklonin ulkokehää pitkin kohti syklonin kärkeä ja sen saavuttaessaan massa lähtee nousemaan syklonin keskeltä pyörteenvangitsijaa kohden. (Hautala, et al., 2009, s. 316-317)

Kuva 3 havainnollistaa tavanomaisen pyörrepuhdistimen rakenteen ja toiminnan (Hautala, et al., 2009, s. 317).



Kuva 3. Pyörrepuhdistimen perusrakenne ja virtaustoiminta. (Hautala, et al., 2009, s. 317)

Pyörrepuhdistimen erottelu perustuu epäpuhtauspartikkeleiden kokoon, tiheyteen sekä muotoon, jolloin painavammat ja suuremmat partikkelit työntyvät kohti kartion seinämää pois pyörteestä. Sen sijaan suuren pinta-alan omaavilla partikkeleilla on suuri todennäköisyys joutua akseptivirtaan. Partikkeleiden osuessa kartion seinämään ne irtautuvat pyörteestä ja valuvat kartion seinämää pitkin kohti kartion nokkaa, missä kyseiset partikkelit poistetaan puhdistimesta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2000, s. 121-122; Hautala, et al., 2009, s. 317)

Pyörrepuhdistimien toimintaperiaate riippuu tavasta jolla rejekti poistetaan puhdistimesta. Normaalisessa toiminnassa rejekti poistetaan syklonin kärjestä ja akseptivirta poistuu pyörteenvangitsijan luota. Käänteisesti toimivassa pyörrepuhdistimessa rejekti- ja akseptivirrat ovat toisinpäin. Käänteisesti toimivan pyörrepuhdistimen avulla voidaan erottaa erittäin kevyet partikkelit massavirrasta, jolloin tavoitteena on johtaa suurin osa puhdistimeen syötetystä virrasta syklonin kärkeen. Edellä mainittujen lisäksi on kehitetty läpivirtaussykloni, jossa aksepti- ja rejektivirta poistetaan syklonin kärjestä. Kyseinen menetel-

mä on kehitetty erittäin kevyiden epäpuhtauksien erottelua varten. (Bliss, 1992a, s. 251-256)

Pyörrepuhdistimien toiminnasta riippuen massavirran syöttösakeus on n. 1,0 - 3,5 %, mikä on huomattavasti matalampi kuin painelajittimilla. Lisäksi, hienojakeista pyörrepuhdistinta, jota käytetään kaikkein pienimpien epäpuhtauspartikkeleiden puhdistukseen paperinvalmistuksessa, operoidaan 0,5 - 1,5 % sakeuksissa. Pyörrepuhdistimet luokitellaan syöttösakeusvaatimusten mukaisesti HC- (High Consistency), MC- (Medium Consistency) sekä LC-pyörrepuhdistimiin (Low Consistency). (Hautala, et al., 2009, s. 319)

Vaikka pyörrepuhdistin on periaatteessa parempi erottelemaan hienoja ja kevyitä epäpuhtauspartikkeleita kuin painelajitin, on puhdistimen käyttö energiankulutuksen kannalta kustannustehoton vaihtoehto. Matala syöttösakeus sekä puhdistimen pieni koko vaativat enemmän pumppaamisenergiaa sekä usean puhdistinyksikön kytkemistä rinnan, että päästään vastaaviin kapasiteettilukemiin painelajittimien kanssa. (Eck, et al., 1985; Karnis, 1997; Ouellet, et al., 2003)

Pyörrepuhdistukseen erottelutehokkuuteen vaikuttaa pyörrepuhdistimen operointiparametrit, lajiteltavan massan ominaisuudet sekä puhdistimen geometria. Puhdistimen geometria on edellä mainituista tekijöistä merkittävin. Lisäksi, puhdistettavan massan syöttösakeus on valittava soveliaalle tasolle, jossa puhdistin ei mene tukkoon. (Krotscheck, 2006, s. 586-588)

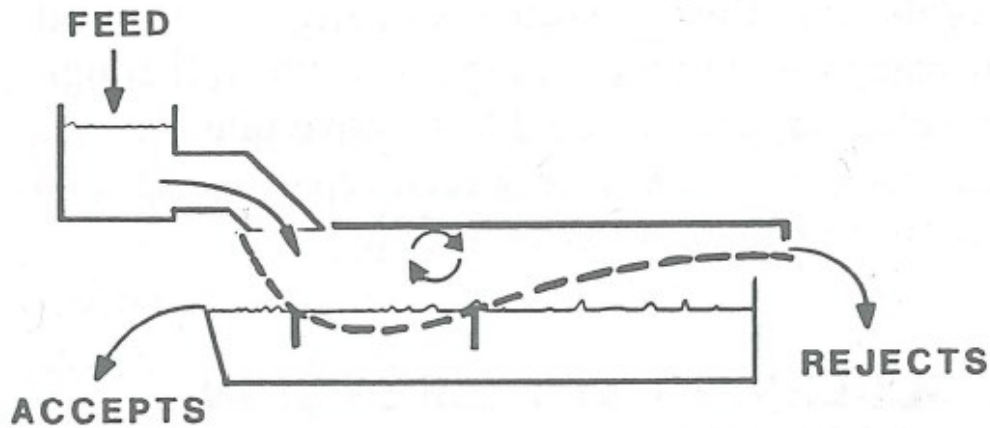
4.3.2 Täryseula

Täryseula on yksi vanhimmista edelleen käytössä olevista massanseulontatekniikoista. Täryseuloja käytetään enimmäkseen kaikkein karkeimman rejektin poisseulomiseksi, jolloin käytettävät sihtiaukkojen koot ovat suurempia kuin painelajittelussa. Tästä johtuen täryseulan epäpuhtauksien erottelutehokkuus on varsin alhainen. Kuituhäviöitä syntyy sen sijaan erittäin vähän, sillä lähes kaikki kuitumateriaali läpäisee sihdin. Lisäksi täryseulan rejektivirran sakeus on varsin korkea, n. 8 - 20 %, mikä vähentää rejektin sakeuttamiseen vaadittua laitteistoa. (Bliss, 1992b, s. 242)

Täryseulan hyödyntäminen nykyisissä prosesseissa perustuu pitkälti rejektivirran sakeuteen sekä kuituhäviöiden minimimäärään. Täryseulan toimintaperiaate on varsin yksinkertainen, sillä lajiteltava massa asetetaan seulan sihtipinnalle, josta aksepti valuu lävitse ja rejekti jää sihdinpinnan päälle. Täryseulan tukkeutuminen ja rejektin eteenpäin siirtäminen mahdollistetaan seulan tärinällä, mistä seulan nimitys on saanut alkunsa, jolloin

tärinän aiheuttama liike-energia siirtää rejektiä kohti rejektisäiliötä. (Bliss, 1992b, s.242-243)

Kuva 4 esittää yksinkertaisen täryseularatkaisun (Bliss, 1992b, s. 243).



Kuva 4. Yksinkertainen täryseularatkaisu. (Bliss, 1992b, s. 243)

4.3.3 Muut seularatkaisut

Edellä mainittujen laitteiden lisäksi alalla on monta muutakin vastaavaa seularatkaisua, joista ehkä tyypillisimmät ratkaisut ovat oksanerottimet, oksapesurit, muunlaiset sihtipintarakenteet kuten kaarisihti ja pyöröseula sekä keskipakolajittimet. Kaikkia edellä mainittuja lajitinratkaisuja yhdistää sama päätavoite, lajittimen erottelutehokkuuden tulee olla mahdollisimman hyvä vähin kuituhäviöin.

Lajittelutekniikkaa on pyritty edistämään vuosien varrella. Esimerkiksi Mollet et al. (1979) teettämässä tutkimuksessa selvitettiin pyöröseulaa muistuttavan lautassuuttimen soveltuvuutta kuitumassan lajittelu- ja puhdistusprosesseihin. Tutkimuksen pilottikokeissa huomattiin lautassuuttimen toimivan yllättävän hyvin epäpuhtauksien poistossa, virtausmäärän ollessa n. 630 litraa tunnissa. Laitteen kapasiteetti on silti aivan liian pieni käytettäväksi normaaleissa prosesseissa. (Moller, et al., 1979)

4.4 Taselaskenta

Lajittelu perustuu erotteluun, jolloin taselaskentaa hyödynnettäessä voidaan olettaa, että valitun tasealueen sisällä on ainoastaan syöttövirtaus sekä poistovirtaukset. Lajittimen sisällä ei näin ollen synny eikä tuhoudu massaa. Yhtälö 4 kuvaa lajittimen massatasetta,

$$\dot{m}_F = \dot{m}_A + \dot{m}_R \quad (4)$$

missä	\dot{m}_F	on syöttövirran massavirtaus (kg/s)
	\dot{m}_A	on akseptivirran massavirtaus (kg/s)
	\dot{m}_R	on rejektivirran massavirtaus (kg/s)

Sama yhtälö voidaan kirjoittaa tilavuusvirtauksien mukaan, jolloin on otettava huomioon massavirtauksien sakeus. Tällöin yhtälö 4 muuntuu yhtälöksi 5,

$$\dot{V}_F \times c_F = \dot{V}_A \times c_A + \dot{V}_R \times c_R \quad (5)$$

missä	\dot{V}_F	on syöttövirran tilavuusvirtaus (m ³ /s)
	\dot{V}_A	on akseptivirran tilavuusvirtaus (m ³ /s)
	\dot{V}_R	on rejektivirran tilavuusvirtaus (m ³ /s)
	c_F	on syöttövirran sakeus (%)
	c_A	on akseptivirran sakeus (%)
	c_R	on rejektivirran sakeus (%)

4.5 Yhteenveto

Massan lajittelu- ja puhdistusvaihe on tarpeellinen kaikissa paperin- ja kartonginvalmistusprosesseissa. Lajittelu- ja puhdistusvaiheen päällimmäisenä tavoitteena on erotella kuitumassasta epäpuhtaudet pois mahdollisimman tarkasti ja vähin kuituhäviöin. Lisäksi lajittelu- ja puhdistusvaiheen tarkoituksena on suojata paperikoneen kalliita ja kulumiselle herkkiä laiteosia.

Valmistetun kuitumassan joukkoon joutuu paljon erilaisia ja erikokoisia epäpuhtauksia, kuten kuorta, hiekkaa, kiveä, metallia, pigmentti- ja liimajäämiä sekä muita ei-kuitupohjaisia materiaaleja. Epäpuhtaudet heikentävät sekä paperikoneen ajettavuutta että valmistetun lopputuotteen laatua. Epäpuhtauksien aiheuttamat ongelmat ovat erittäin tyyppillisiä valkaistun paperin valmistusprosesseissa.

Lajitteluvaiheessa massa erotellaan joko partikkelikoon tai kuidunpituuden mukaan, riippuen prosessia varten käytetystä laitteesta. Lajittelua varten on kehitetty monta erilaista laitetta, joista painelajitin on kaikkein yleisin. Painelajitin käsitellään tarkemmin kappaleessa 5. Massan puhdistusvaiheessa massasta erotellaan kaikkein pienimmät epäpuhtausfraktiot. Massan puhdistusta varten käytetään pyörrepuhdistimia niiden erottelutehokkuu-

den takia. Pyörrepuhdistimet on jaoteltu niiden syöttösakeuden mukaan korkeasakeus-, keskisakeus- ja matalasakeuspuhdistimiksi. Lisäksi pyörrepuhdistinta voidaan operoida käänteisesti, jolloin massasta erotellaan erittäin kevyet epäpuhtaudet rejektiksi.

Taulukko 1 esittää tavanomaisimmat epäpuhtauspartikkelit sekä niiden poistamiseen soveltuvat lajitin-/puhdistinmallit (Bliss, 1992a, s. 257). Vaikka pyörrepuhdistimet osoittautuvat erittäin soveltuviksi puhdistuslaitteiksi, niin niitä tarvitaan monta rinnakkain, että päästään samalle kapasiteettitasolle painelajittimen kanssa. Alalla puhutaan pyörrepuhdistinlaitoksista, joissa on kymmenittäin pyörrepuhdistimia rinnakkain ja sarjaan kytkettyinä. Lisäksi, pyörrepuhdistin kuluttaa erittäin paljon energiaa, jolloin on valittava riittävän kustannustehokas puhdistusmenetelmä, jolla saavutetaan lopputuotteen laatuvaatimukset.

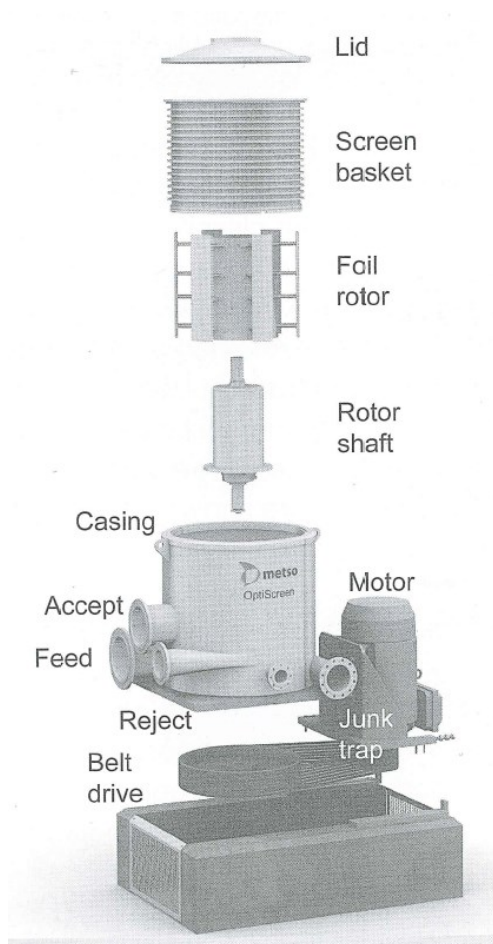
Taulukko 1. Tavanomaisimmat epäpuhtauspartikkelit ja niiden poistamiseen soveltuvat laitteet. (Bliss, 1992a, s. 257)

Epäpuhtauspartikkeli	Painelajitin	HC- pyörrepuhdistin	MC- pyörrepuhdistin	LC- pyörrepuhdistin
Tikut	x	x	x	
Hiekka / Kiviaines		x	x	x
Paksuseinämäiset solut, kuten sklereidit			x	
Kuori, sekä sisä- että ulko-kuori		x	x	
Pihka		x	x	x
Muut epäpuhtaudet		x	x	x
Jauhamattomat kuidut	x	x	x	x

5 PAINELAJITIN

5.1 Yleistä

Painelajitin on yksinkertainen, paineissa toimiva erottelulaite, jossa massavirralle on yksi sisäänvalo, syöttö, ja kaksi ulostuloa, aksepti ja rejekti (Gallagher, 1997, s. 17-18). Paine-
lajitin on perusrakenteeltaan sylinterin muotoinen, jonka sisällä on lajitinkori sekä lajitin-
korin seinämää kiertävä roottori (Gallagher, 1997, s. 17-18; Bliss, 1992b, s. 231-232).
Sylinterinmuotoisen painelajittimen on todettu toimivan paremmin kuin tasolajittimen,
sillä se kestää huomattavan paljon enemmän painetta (Hawkes, 1990; Bliss, 1992b, s.
231-232). Lisäksi painelajitinta pystytään käyttämään korkeammassa virtausnopeudessa,
mikä on edellytyksenä korkeamman tuotantokapasiteetin ylläpitämiseksi (Hawkes, 1990).
Kuva 5 esittää yksivaiheisen painelajittimen rakenteen (Hautala, et al., 2009, s. 288).

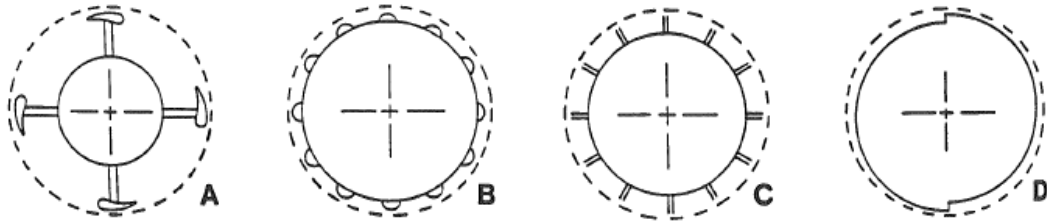


Kuva 5. Yksivaiheisen painelajittimen rakenne. Perusrakenteen lisäksi lajittimessa on rejektiloukku, joka voidaan tyhjentää jaksottaisesti (Hautala, et al., 2009, s. 288).

5.2 Rakenne

5.2.1 Roottori

Painelajittimen roottori voi olla joko siivekkeillä, kiinteällä ytimellä tai edellä mainittujen kombinaatiolla varustettu (Gallagher, 1997, s. 18). Ulokkeiden tarkoituksena on saattaa sihtirummun sisällä oleva kuitusulppu liikkeeseen (Gallagher, 1997, s. 18). Siivekkeet ja lavat ovat käytetyimmät ulokkeet avoimissa roottoreissa ja roottorin kylkeen kiinnitetyt kummut ja läpät ovat käytetyimmät ulokkeet kiinteissä roottoreissa (Bliss, 1992b, s. 232). Avoimet roottorit soveltuvat paremmin sakeiden massojen lajitteluun, sillä ne pystyvät luomaan enemmän turbulenttista virtausta kuin kiinteät roottorit (Bennington & Kerekes, 1996; Karvinen & Halonen, 1984). Kuva 6 havainnollistaa erilaisia roottorityyppejä, joita käytetään teollisissa prosesseissa (Bliss, 1992b, s. 232).

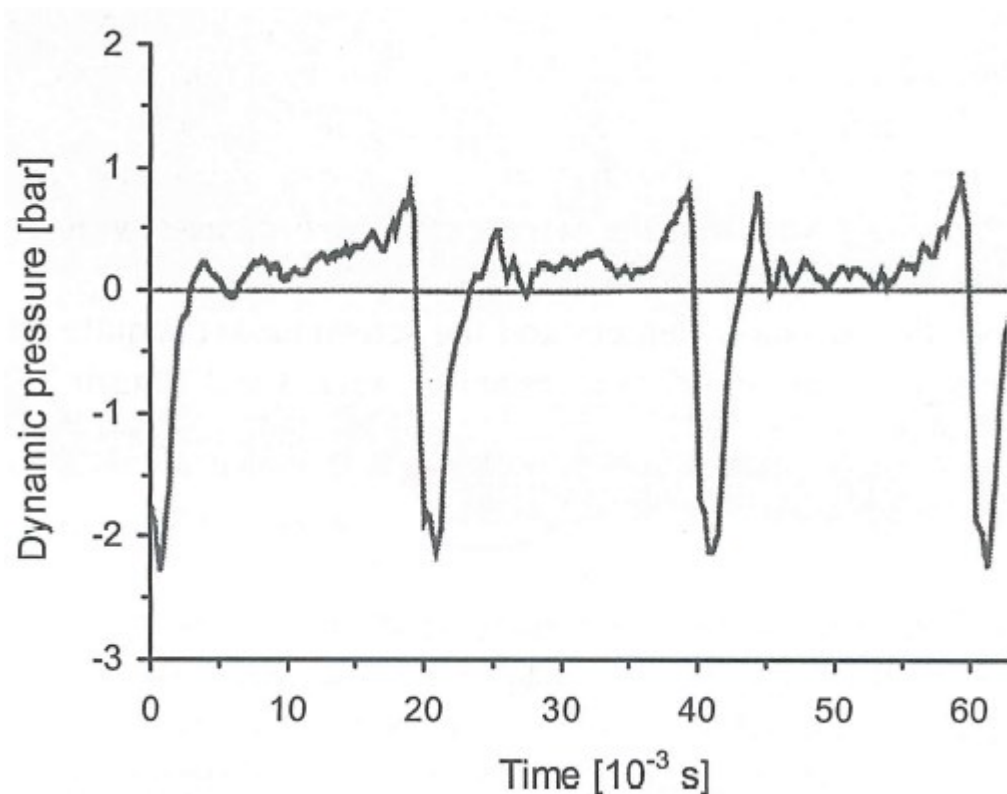


Kuva 6. Painelajittimen roottoreita erilaisin elementein, joiden avulla luodaan sihtipinnan puhdistava vastavirtahuuhtelu. A siivekeroottori, B kumpuroottori, C läppäroottori ja D suipporoottori. (Bliss, 1992b, s. 232)

Kuitusulpuille tyypillinen ominaisuus on sulpun sisältämien kuitujen välinen interaktio (Krotscheck, 2006, s. 562). Kuitujen välinen interaktio mahdollistaa kuituflokkien, -verkostojen tai -mattojen muodostumisen kuitusulpussa. Tämä on haitallinen tekijä kaikissa massan valmistelu- ja käsittelyprosesseissa (Krotscheck, 2006, s. 562). Painelajittelussa kuituflokkit ja -verkot muodostuvat usein sihtipinnalle kahden aukon väliselle kiinteälle alueelle, jolloin ne peittävät osan sihtipinnasta (Bliss, 1992b, s. 232). Roottorin päätaavoitteena on kehittää lajittimen sihtikorissa olevaan massaan turbulenttista virtausta (Julien Saint Amand & Perrin, 1999), jota kutsutaan myös massan fluidisaatioksi, jonka avulla lajitinkorin sihtipinta ja sen aukot pysyvät avoimina kuituflokeista ja epäpuhtauksista (Julien Saint Amand & Perrin, 1999), jotka saattaisivat muutoin tukkeuttaa lajittimen estäen massavirtauksen lajittimessa (Bliss, 1992b, s. 232).

Roottorin tukkeutumista ehkäisevä massan fluidisaatio syntyy painepulsseista, joita roottorin ulokkeet luovat (Karvinen & Halonen, 1984). Siivekkeen muoto luo negatiivisen

painepulssin, jota kutsutaan myös imuksi, sihtikorin pinnalle. Siivekkeen kulkeutuessa sihtikorin aukon ohitse syntyy aukkoon negatiivinen painepulssivirtaus, mikä puhdistaa sihtikorin aukon (Julien Saint Amand & Perrin, 1999; Karvinen & Halonen, 1984). Tutkimukset (Fredriksson, 1995; Julien Saint Amand & Perrin, 1999; Karvinen & Halonen, 1984) ovat osoittaneet, että siivekeroottorit kykenevät luomaan vahvemman lyhytkestoisen painepulssin kuin kiinteät kumpuroottorit. Siivekeroottoreita hyödynnetään sakeamille massoille niiden suhteellisesti paremman fluidisointikyvyn vuoksi (Atkins, et al., 2005; Bennington & Kerekes, 1996; Fredriksson, 1995). Kuva 7 esittää avoimen siivekeroottorin luoman negatiivisen painepulssin sen ohittaessa sihtikorin pinnan (Krotscheck, 2006, s. 574).



Kuva 7. Siivekeroottorin luoma painepulssi siivekkeen ohittaessa sihtipinnan aukon (Krotscheck, 2006, s. 574).

Niin ikään energiankäytön kannalta siivekeroottori on todettu olevan matalaenergisempi vaihtoehto kuin kiinteät roottorit (Atkins, et al., 2005; Fredriksson, 1995; Julien Saint Amand & Perrin, 1999). Sekä Henricson et al. (1989) että Karvinen & Halonen (1984) tutkivat siivekeroottorin luomaa painepulssia ja sen vaikutusta muihin osaprosesseihin. Tutkimuksissaan he huomasivat, että painepulssit aiheuttavat häiriöitä muissa prosesseissa. Muun muassa perälaatikolla muodostuvan paperirainan neliöpainoerot poikkiradassa

on todettu johtuvan painepulssien aiheuttamista sakeusheitoista perälaatikossa (Bliss, 1992b, s. 240). Molemmat tutkimusryhmät (Henricson, et al., 1989; Karvinen & Halonen, 1984) suosittelevat käyttämään siivekkein varustettuja roottoreita painepulssierojen taasaamiseksi. Myös Javidin (1983) tutkimus vahvistaa oletuksen, että painepulssierot vähentyvät useamman siivekkeen käytön myötä.

Painelajittimen roottorin toissijainen tavoite on kasvattaa painelajittimen kapasiteettia. Turbulentitiset olosuhteet edistävät virtaavan aineksen todennäköisyyttä päätyä akseptiin. Kapasiteetin nostoa voidaan hyödyntää prosessissa kahdella eri tavalla; joko kasvattamalla painelajittimen syöttösakeutta tai lisäämällä massan virtausmäärää sihtipinnan lävitse (Jokinen, et al., 2007). Useimmissa tapauksissa kapasiteetin lisäys hyödynnetään kasvatamalla massan syöttösakeutta, sillä syöttösakeuden kasvattaminen parantaa lajittelun erottelutehokkuutta (Pinon, et al., 2003).

Myös roottorin muoto vaikuttaa lajittelutehokkuuteen ja lajittimen hallittavuuteen (Bliss, 1992, s. 232-233). Tieteellisen tutkimuksen perusteella on osoitettu, että tasalaatuinen virtaus koko painelajittimen sihtipinnan pituuden mukaisella matkalla edistää lajittelun tehokkuutta ja toimintavarmuutta (Fredriksson, 1995). Halonen et al. (1989) teettämässä tutkimuksessa todettiin, että konventionaalisessa painelajittimessa akseptiin johdettavan massan virtausmäärästä kaksi kolmasosaa virtaa läpi sihtipinnan painelajittimen alkupäässä. Tämä johtuu rejektin sakeutumisesta, jolloin helppopääsyinen materiaali, kuten vesi ja pienikokoiset partikkelit, läpäisee sihtipinnan lajittimen alkupäässä vaikeuttaen lajittelua lajittimen loppupäässä (Krotscheck, 2006, s. 569).

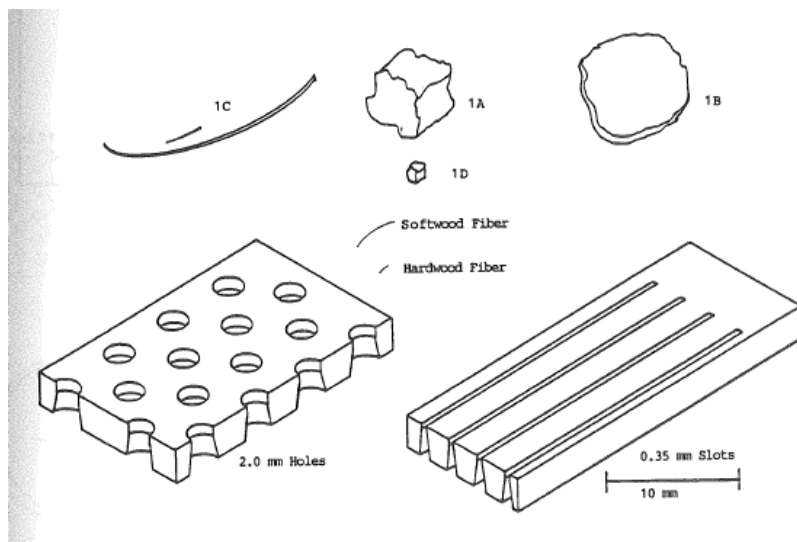
Ilmiön estämistä varten on kehitetty kartionmuotoisia roottoreita, jotka levenevät alaosaan, jolloin sihtipinnalle muodostuu tasainen virtauspaine koko sihtipinnan matkalle (Halonen, et al., 1989). Myös Niinimäki et al. (1996b) ovat tutkineet edellä mainittua ilmiötä. Tutkimuksessaan he selvittivät kuinka kartiomallista roottoria käyttämällä saadaan aikaan tasaisempi lajittelutehokkuus sihtipinnan pituussuunnassa. Kuva 8 esittää kartiomallisen roottorin (Anon., 1994).



Kuva 8. Siivekkeillä varustettu kartionmuotoinen roottori. (Anon., 1994)

5.2.2 Sihtirummun aukot

Sihtirumpu on painelajittimen tärkein osa, sillä se ohjaa koko lajitteluprosessia ja sen tehokkuutta (Gallagher, 1997, s. 19). Sihtirummun aukkoista riippuen kuidut, tikut ja epäpuhtaudet ohjautuvat joko akseptin tai rejektin puolelle (Gallagher, 1997, s. 19). Sihtirummun aukkoilla tarkoitetaan sihtirummun pintaan poratuista rei'istä tai mekaanisesti koneistettujen hahloista, joita kutsutaan myös raoiksi (Gallagher, 1997, s. 19-20). Kuva 9 esittää erimuotoisten partikkeleiden kokoja suhteessa lajitteluaukkojen kokoon (Bliss, 1992b, s. 231).



Kuva 9. Epäpuhtauspartikkeleiden ja sihtipintojen aukkojen koot suhteessa toisiinsa. Ku-
vassa merkattu seuraavat; 1A on isompi kuutionmuotoinen partikkeli, 1B on levymainen
partikkeli, 1A on tikku tai särö, 1D on pienempi kuutionmuotoinen partikkeli. Lisäksi havu-

ja lehtipuukuitu, joiden leveydet on suurennettu 5-kertaiseksi paremman kuvalaadun takia. Alimpana 2,0 mm reikäsihti ja 0,35 mm rakosihti. (Bliss, 1992b, s. 231)

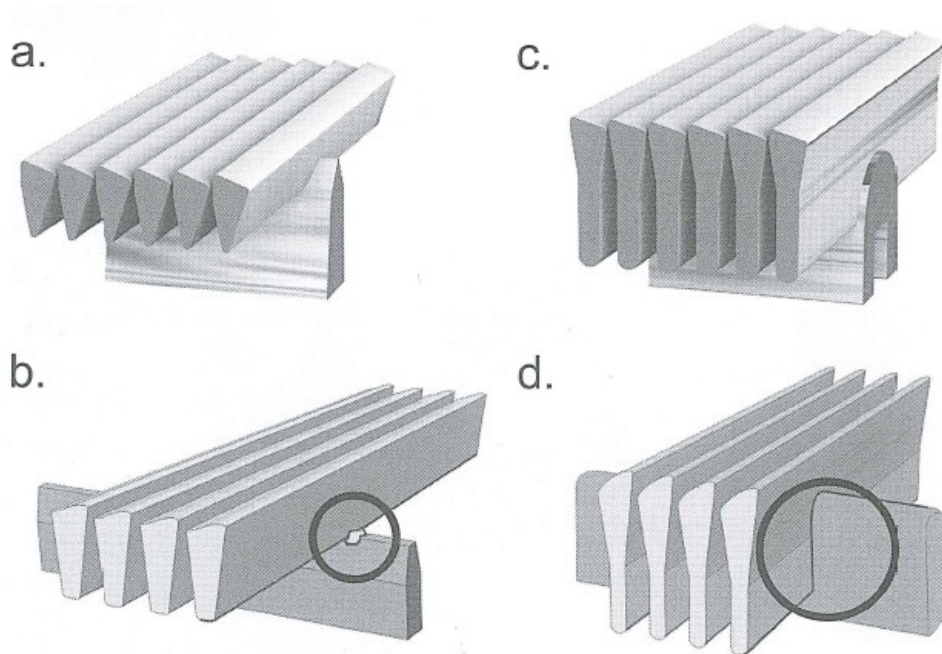
Sihtirumpujen reikien ja rakojen koko määräytyy aina halutun erottelutehokkuuden mukaan, missä kapeat reiät ja raot mahdollistavat tarkemman erottelutehokkuuden (Bliss, 1992, s. 233-236). Pidemmät kuidut ja tikut päätyvät lähestulkoon aina rejektiin, mutta rejektiin voi myös päätyä paljon akseptiksi luokiteltavaa ainesta (Eck, et al., 1985; Liukkonen & Bengs, 2001; Schabel & Respondek, 1997). Lajitteluun liittyvä este- ja todennäköisyysseulonta on täten riippuvainen käytettävien aukkojen koosta, sillä mitä pienempi aukon koko, sitä todennäköisemmin yhden dimension suuntaisesti aukkoa suuremmat partikkelit päätyvät rejektiin (Pemble, 1987; Gallagher, 1997, s. 20-21).

Monet tutkimukset (Haikkala, et al., 1994; Heise, 1988; Liukkonen & Bengs, 2001; Niinimäki, et al., 1998; Gallagher, 1997, s. 19-21) osoittavat rakosihdin olevan selvästi tehokkaampi sihtirumpu puhdistuslajittelua varten kuin reikäsihti. Tehokkaampi puhdistus perustuu pienempään aukkoon, jolloin kuutionmuotoiset epäpuhtaudet lajitellaan rejektiksi esteseulontaperiaatteen mukaisesti (Gallagher, 1997, s. 21). Rakosihdin ongelmaksi muodostuu kapasiteetin rajoite, sillä pienempi aukko vähentää lajittimen kapasiteettia (Gallagher, 1997, s. 20). Kohrs (1992) sen sijaan osoitti, että yhdistelemällä eri vaiheissa toimivia lajittimia erilaisin sihtipinnoin, voidaan päästä erittäin hyviin erottelutehokkuuksiin. Kokeissaan Kohrs käytti kahta erillistä lajitinta, joista ensimmäinen varustettiin reikäsihdillä ja toinen rakosihdillä. Kyseinen kombinaatio tuotti kaikkein puhtaimman akseptivirran muihin kombinaatioihin nähden.

Olson et al. (1998), Olson et al. (2000) sekä Olson (2001) osoittivat omissa tutkimuksissaan, että reikäsihdit soveltuvat paremmin fraktiointilajitteluun kuin rakosihdit. He olettavat tämän johtuvan reikäsihtien toimintatavasta lajitella massaa. Reikäsihdin on osoitettu (Olson, et al., 2000; Braaten & Wakelin, 1999; Corson, et al., 1996) lajittelevan kuitumassaa kuidunpituuden mukaan muodostaen näin selkeät erot aksepti- ja rejektivirtojen kuidunpituusjakaumissa. Lisäksi Olson (2001), Gallagher (1997), Krottscheck (2006, s. 571-572) sekä Pemble (1987) ehdottavat rakosihdin soveltuvan paremmin puhdistuslajitteluun, mikä tukee aiemmin mainittua johtopäätöstä rakosihtien paremmasta toimivuudesta pienikokoisten ja kuutionmuotoisten epäpuhtauspartikkeleiden poisseulonnassa.

Tekniikan kehityksen myötä on pystytty teettämään rakosihtejä, jotka ovat entistä tehokkaampia erottelemaan epäpuhtaudet massasta ilman tuntuvaan kapasiteetin menetystä (Jokinen, et al., 2007). Osoituksena tekniikan kehityksestä on kiilalankasihti, jossa sihti-

rumpu muodostetaan hitsaamalla yhteen kiilanmuotoisia lankoja sylinterin muotoisiin tukiin (Julien Saint Amand & Perrin, 2001). Menetelmällä pystytään valmistamaan entistä tarkempia ja pienirakoisempia sihtejä (Gallagher, 1997, s. 20). Kuva 10 esittää eri kiilalankasihtien rakenteita (Hautala, et al., 2009, s. 290). Kuvissa a- ja b-vaihtoehdot ovat perinteisiä kiinnitysratkaisuja (Dangeleit, 2005), ja c- ja d-vaihtoehdot esittävät uudenlaista kiinnitystekniikkaa (Weckroth, et al., 2001).



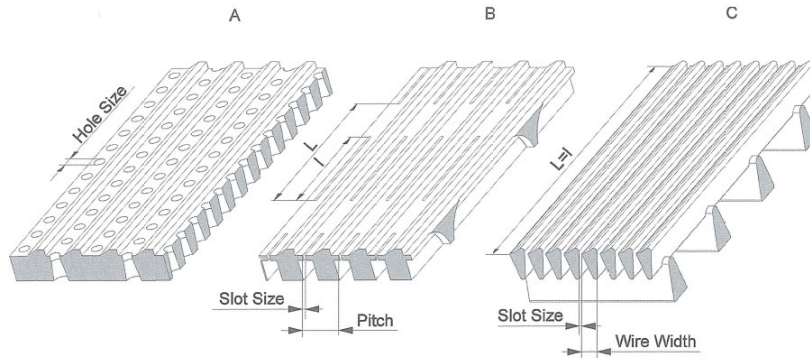
Kuva 10. Kiilalankasihtien kiinnitysmenetelmät. (Hautala, et al., 2009, s. 290)

Kiilalankasihdin etuna on sen suuri avoin pinta-ala sekä pyöristetyt reunat, jotka vähentävät kitka- ja virtausvastusta (Julien Saint Amand & Perrin, 2001). Tutkimukset osoittavat, että käytettäessä samankokoista rakosihtiä, on kiilalankasihdin kapasiteetti huomattavasti korkeampi, koska sillä on suurempi avoin ala koneistettuun rakosihtiin nähden. (Ahnger, 1995; Anon., 1994; Jokinen, et al., 2007; Krotscheck, 2006, s. 573)

5.2.3 Sihtirummun profiili

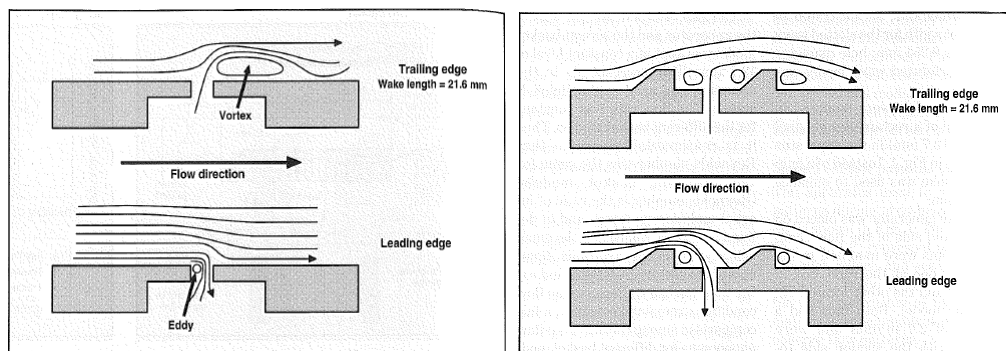
Sihtirummun pinta voi olla joko profiloitu tai sileä riippuen lajittimen käyttötarkoituksesta (Niinimäki, et al., 1998). Sileitä sihtirumpuja käytetään yhä enenevässä määrin fraktiointiin liittyvissä konsepteissa, sillä sileäpintainen rumpu ei muodosta ylimääräisiä turbulentsisia olosuhteita, jolloin aukon suuntaista orientoitumista ei tapahdu (Olson, et al., 1998; Olson, et al., 2000). Profiloidun pinnan tarkoituksena on luoda lisää turbulenssia sihtikorin pinnan läheisyydessä, mikä edistää sekä läpipääsyä että kapasiteettia (Gooding & Kerekes, 1992; Halonen, et al., 1989; Jokinen, et al., 2007; Niinimäki, et al., 1998).

Turbulentitiset olosuhteet soveltuvat paremmin puhdistuslajitteluun, jossa pyritään erottelemaan riittävän tehokkaasti epäpuhtaudet massavirrasta säilyttäen tietyn kapasiteettitason lajittimelle (Gooding & Kerekes, 1992; Gallagher, 1997, s. 21-22). Kuva 11 havainnollistaa sihtirummun profiloinnin erilaisilla aukoilla (Hautala, et al., 2009, s. 302).



Kuva 11. Profiloitut sihtirumpupinnat eri aukoilla; A) reikäsihti, B) rakosihti sekä C) kiilalankasihti. (Hautala, et al., 2009, s. 302)

Turbulenttisuus johtuu virtaussuuntien muutoksesta, jolloin massassa olevat kuidut pyrkivät orientoitumaan aukon suuntaisesti mahdollistaen helpomman läpipääsyn (Gooding & Kerekes, 1989). Lukuisat tutkimukset tukevat oletusta sihtipinnan profiilin vaikuttavan edistävästi lajittimen kapasiteettiin ja heikentävästi lajittimen erottelutehokkuuteen (Ahnger, 1995; Baehr & Rienecker, 1991; Gooding & Kerekes, 1989; Olson, et al., 1998; Pemble, 1987). Kuva 12 esittää kuitujen liikeradat sileäpintaisella sihdillä ja kuva 13 esittää kuitujen liikeradat profiloituneen sihtipinnan pinnalla lajitteluaukon lähellä (Yu & DeFoe, 1994).



Kuva 12. Kuitujen liikeradat sileäpintaisen sihtipinnan pinnalla lajitteluaukon lähellä. (Yu & DeFoe, 1994)

Kuva 13. Kuitujen liikeradat profiloituneen sihtipinnan pinnalla lajitteluaukon lähellä. (Yu & DeFoe, 1994)

Edellä mainituista kuvista huomataan, että massojen virtausprofiilit eroavat huomattavasti toisistaan. Profiloitunut sihtipinnat luovat pyörrettä sihtipinnalle, jolloin kuidut orientoituvat kohti lajitteluaukkoa, helpottaen kuitujen läpipääsyä (Bliss, 1992b, s. 235-236; Yu & DeFoe, 1994). Sileällä sihtipinnalla huomataan selkeä jättöpyörre lajitteluaukon jälkeen, joka heikentää lajittelutehokkuutta (Yu & DeFoe, 1994). Myös teräväreunainen aukko aiheuttaa huomattavaa virtausvastusta, pienentäen näin kuitujen lajittelutehokkuutta (Bliss, 1992b, s. 235-236; Yu & DeFoe, 1994).

Profiloidun pinnan huonona puolena on sen heikentynyt erottelukyky, jolloin osa ei-halutusta materiaalista saattaa päästä sihdin läpi (Gooding & Kerekes, 1992; Niinimäki, et al., 1998). Vastaväitteitä kuitenkin löytyy, sillä parantuneet virtausolosuhteet sihtipinnan läheisyydessä luovat mahdollisuuden hyödyntää entistä pienempää aukkoa, jolloin erottelutehokkuus on huomattavasti parempi (Halonen, et al., 1989; Henricson, et al., 1989; Gallagher, 1997, s. 21-22). Lajittimen laiteominaisuudet, roottori, sihtirummun aukot sekä pinta, valitaan lajittimen käyttötarkoituksista ja lajitteluvaatimuksista riippuen (Bliss, 1992b, s. 239). Riippuen tilanteista, eräät lajittimet soveltuvat puhdistukseen ja toiset fraktiointiin (Gallagher, 1997, s. 21).

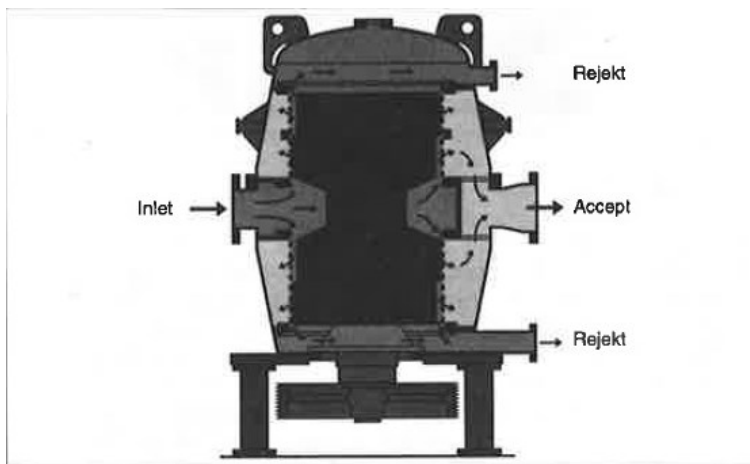
5.2.4 Syöttötapa

Painelajittimet eroavat myös tavalla, jolla massaa syötetään lajittimeen. Syöttötapa riippuu syöttösuunnasta, toisin sanoen syötetäänkö massa lajittimeen aksiaalisesti tai tangentiaalisesti (Hourula, et al., 1996; Niinimäki, et al., 1996a). Menetelmät eroavat toisistaan selvästi, sillä tangentiaalisesti syötetty massa vaatii erillisen syöttöpumpun ennen lajitinta, kun taas aksiaalisen syötön omaava lajitin muistuttaa keskipakopumpun toimintaa (Hourula, et al., 1996). Lajittimessa roottori pyörii lajittimen akselin ympärillä kehittäen keskipakovoiman, joka työntää lajiteltavaa massaa kohti roottorin ulkokehää (Hourula, et al., 1996; Niinimäki, et al., 1996a). Lopulta massa läpäisee sihtipinnan päätyessään akseptiin, josta se virtaa keskipakovoiman luoman paineen avulla seuraavaan prosessivaiheeseen (Hourula, et al., 1996; Niinimäki, et al., 1996a).

Keskipakovoiman ansiosta aksiaalisesti syötettävät lajittimet on mahdollistaa kytkeä toisiinsa ilman ylimääräisiä välivarastoja ja pumppuja (Hooper, 1984). Välivarastojen tai pumppujen tai molempien poistaminen pienentää lajitteluolosuhteiden käyttökustannuksia ja pääomakustannuksia, sillä lajitteluun vaaditun energian käyttö vähenee samalla vapauttaen tehdasrakennuksen lattiapintaa käytettäväksi muihin toimintoihin (Hawkes, 1990; Hooper, 1984; Hourula, et al., 1996).

Niinimäki et al. (1996a) tutkivat myös kuinka lajittimen toimintaa voitaisiin tehostaa hyödyntämällä erillistä syöttökammiota ennen varsinaista sihtipintaa, jossa massa kiihdytetäisiin valmiiksi roottorin nopeuteen. Syöttökammion toissijaisena tehtävänä oli toimia varastotilana negatiivisen painepulssin aikana. Tutkimuksissaan Niinimäki et al. (1996a) eivät löytäneet erillisen syöttökammion käytöstä etua. He kuitenkin totesivat, että aksiaalisesti syötetyn lajittimen toiminta oli energiatehokkaampi valitulla puhtaustasolla.

Myös muun tyyppisiä ratkaisuja on pyritty kehittämään, josta esimerkkinä Voithin kehittämä SPECTRO Screen "D" (Baehr & Rienecker, 1991). Lajittimen syöttö on järjestetty siten, että massa syötetään lajittimen pituussunnassa katsottuna lajittimen keskeltä (Baehr & Rienecker, 1991). Menetelmässä lajitteluprosessilla on käytävissä huomattavasti suurempi osa sihtipinnan pinta-alasta (Baehr & Rienecker, 1991). Suurempi lajittelupinta-ala parantaa erottelutehokkuutta ja kapasiteettia (Julien Saint Amand & Perrin, 2001). Kuva 14 esittää Voithin kehittämän painelajittimen toimintaperiaatteen, jossa massan syöttö tapahtuu lajittimen keskustassa (Baehr & Rienecker, 1991).



Kuva 14. SPECTRO Screen D:n toimintaperiaate. (Baehr & Rienecker, 1991)

5.3 Rejektin sakeutuminen

Rejektin sakeutuminen on lajittimessa tapahtuva sakeusmuutos syöttö- ja rejektivirran välillä. Lähtökohtaisesti vesi ja pienikokoiset partikkelit läpäisevät sihtipinnan helpommin päätyen akseptiin, jolloin isokokoiset partikkelit ohjautuvat rejektivirtaan. Etenkin veden seuloutuminen akseptiin on lajittimen toiminnan kannalta huono tekijä, sillä samanaikaisesti lajittimen rejektivirta sakeutuu. Rejektivirran liiallinen sakeutuminen saat-
taa johtaa lajittimen tukkeutumiseen. (Krotscheck, 2006, s. 566-567)

Lajittimen tukkeutuminen voi johtua kahdesta syystä; kuitujen kasaantumisesta sihtikorin aukkojen välille tai suurikokoisen partikkelin juuttumisesta sihtikorin aukkoon (Gooding & Kerekes, 1992; Gallagher, 1997, s. 41-42). Rejektin sakeutumista varten on kehitetty rejektin sakeutumista kuvaava kerroin. Eräs tutkimus osoitti, että lajittimet ovat vaarassa tukkeutua sakeutumiskertoimen ollessa yli kahden (Wakelin & Corson, 1995). Yhtälö 6 esittää rejektin sakeutumiskertoimen,

$$RTF = \frac{c_r}{c_f} \quad (6)$$

missä c_r on rejektimassavirran sakeus (%) ja

c_f on syötettävän massavirran sakeus (%).

Rejektin sakeutumiskerrointa voidaan muunnella painelajittimen laitteisto-ominaisuuksia sekä ajoparametreja muuttamalla (Gooding & Kerekes, 1992). Rejektin sakeutumiskerroin kasvaa pienentämällä sihtipinnan aukkojen kokoa lajittimen rejektisuhteen pysyessä samana (Liukkonen & Bengs, 2001). Profiloituilla sihtipinnoilla voidaan edistää lajittimen toimintaa, mikä samalla vähentää rejektin sakeutumista (Niinimäki, et al., 1998). Myös roottorin nopeuden lisäys vähentää sakeutumiskerrointa, koska negatiiviset painepulssit lisääntyvät sihdissä. (Braaten & Wakelin, 1999; Gooding & Kerekes, 1992)

Pemble (1987) ja Fredriksson (1984) päättelivät omissa tutkimuksissaan sihtikorin aukon tukkeutumisen johtuvan kahdesta tekijästä, joko operointivirheestä, joka johtaa aukon tukkeutumiseen, tai laitteiston suunnitteluvirheestä, joka johtaa kuitujen kasaantumiseen sihtipinnalle. Hetkellistä tukkeutumista kompensoidaan pyörivällä roottorilla, mikä luo negatiivisen painepulssin sihtikorin pinnalle puhdistuen aukkojen ylle kasaantuneet kuidut, samalla mahdollistaen lajittimen keskeytymätön operointi (Gallagher, 1997, s. 41-42).

5.4 Lajitteluun vaikuttavat tekijät

Lajitteluun vaikuttavat tekijät voidaan luokitella pääsääntöisesti kolmeen kategoriaan; laiteominaisuuksiin, prosessin ajoparametreihin sekä lajiteltavan massan ominaisuuksiin (Krotscheck, 2006, s. 572). Laiteominaisuudet riippuvat laitteessa käytettävistä osista ja niiden mittasuhteista, kuten laitteen koosta, aukon suuruudesta, avonaisen alan suuruudesta sekä roottorityypistä. Prosessin ajoparametrit riippuvat prosessin operointivaatimuksista, kuten sakeudesta, virtausnopeudesta ja rejektisuhteesta. Massan ominaisuuksia ovat massan sakeus, kuidunpituusjakauma, lämpötila ja viskositeetti. Osa ominaisuuksista

on muunneltavissa, kuten ajoparametrit, toisten ollessa kiinteitä, kuten laiteominaisuudet. (Krotscheck, 2006, s. 572)

5.4.1 Rejektisuhde

Rejektisuhdeella tarkoitetaan syötettävän massavirran ja rejektiin ohjautuvan massavirran välistä suhdetta. Rejektisuhde on painelajittimen tärkein operointiparametri (Krotscheck, 2006, s. 575), sillä kyseisellä suhdeluvulla säädetään rejektivirran suuruutta, mikä samanaikaisesti vaikuttaa erottelutehokkuuteen. Rejektisuhde voidaan laskea joko massa- tai tilavuusvirtojen perusteella, ja niitä yhdistää sakeuksien välinen suhde. Yhtälö 7 esittää tilavuusvirtoihin perustuvan rejektisuhteen,

$$RR_V = \frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_F} \quad (7)$$

missä \dot{V}_R on rejektin tilavuusvirtaus (m^3/s) ja

\dot{V}_F on syötön tilavuusvirtaus (m^3/s).

Yhtälö 8 esittää massavirtoihin perustuvan rejektisuhteen,

$$RR_M = \frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_F} \quad (8)$$

missä \dot{m}_R on rejektin massavirtaus (kg/s) ja

\dot{m}_F on syötön massavirtaus (kg/s).

Edellä mainittuja yhtälöitä (7 ja 8) yhdistää massavirtojen välinen sakeussuhde. Yhtälöitä yhdistävä suhde voidaan ilmaista yhtälöllä 9,

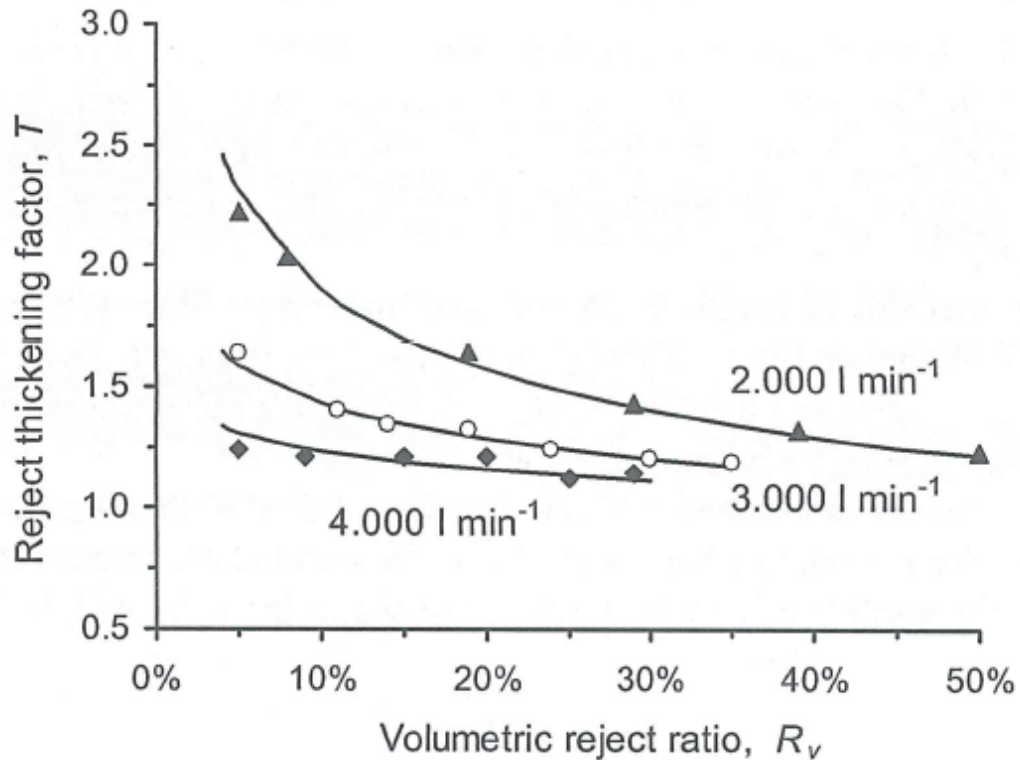
$$RR_M = \frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_F} = \frac{c_R}{c_F} \times \frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_F} = \frac{c_R}{c_F} \times RR_V \quad (9)$$

missä c_R on rejektimassavirran sakeus (%) ja

c_F on syötettävän massavirran sakeus (%).

Rejektisuhdetta pienennettäessä päättyy yhä pienempi osuus rejektiin, mikä lisää akseptiin päätyvän materiaalin määrää (Gallagher, 1997, s. 40-41). Lisäksi toimenpide heikentää lajittimen erottelutehokkuutta (Braaten & Wakelin, 1999; Gallagher, 1997, s. 40-41). Tehdasprosessien painelajittimia operoidaan tyypillisesti 10 - 30 % tilavuusvirtoihin perustuvalla rejektisuhdeella (Krotscheck, 2006, s. 575). Liian alhaisen rejektisuhteen ylläpitäminen voi johtaa rejektin liialliseen sakeutumiseen ja lajittimen tukkeutumiseen

(Braaten & Wakelin, 1999; Gallagher, 1997, s. 40-41). Kuva 15 esittää rejektisuhteen ja rejektin sakeutumista kuvaavan suhteen (Krotscheck, 2006, s. 576). Kuvasta nähdään rejektisuhteen laskusta johtuva rejektin sakeutuminen, mikä voi johtaa lajittimen tukkeutumiseen.



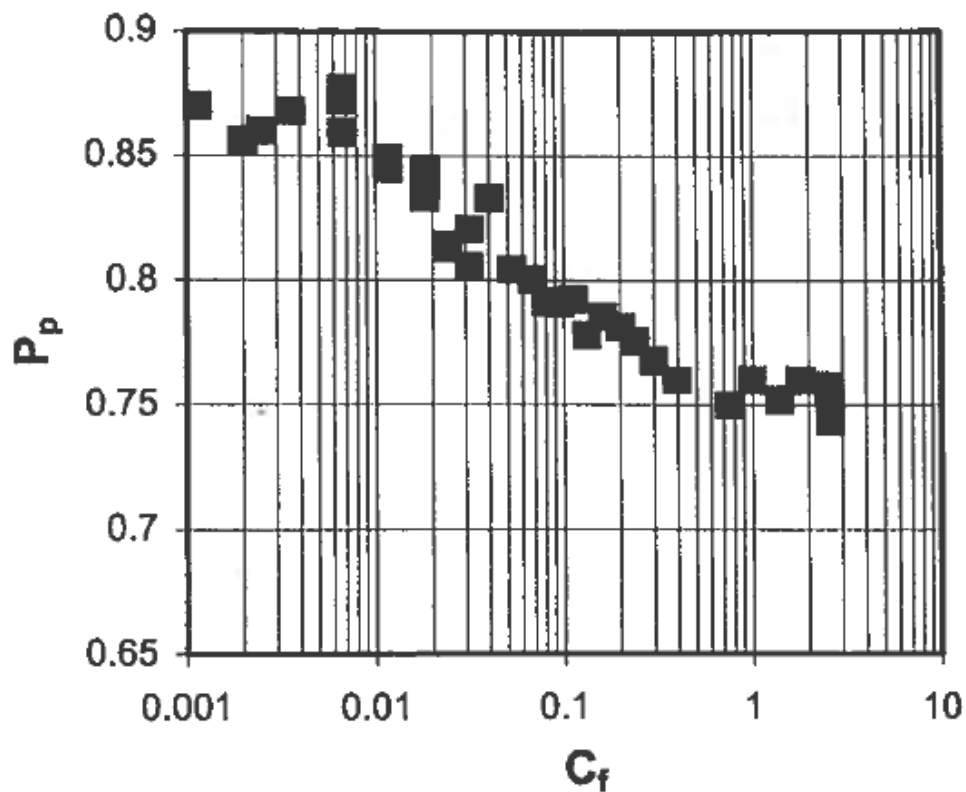
Kuva 15. Rejektin sakeutuminen tilavuusrejektisuhteen funktiona (Krotscheck, 2006, s. 576).

Drolet ja Grenier (1982) osoittivat kuinka rejektisuhdetta muuttamalla pystyttiin parantamaan lajittelujärjestelmän erottelutehokkuutta. Tutkimuksesta ilmenee, että ensimmäisen vaiheen lajittimen rejektisuhde on merkittävin tekijä lajitteluprosessin kokonaistehokkuuden kannalta. Seuraavien vaiheiden rejektisuhdetta mukauttamalla pyritään ainoastaan minimoimaan lajittelujärjestelmän kuituhäviöt. Drolet ja Grenier ehdottavatkin ensimmäistä lajitinta operoitavan suuremmalla rejektisuhteella ja sitä seuraavia lajitinvaiheita pienemmällä rejektisuhteella. Tällöin saavutetaan maksimaalinen erottelutehokkuus minimoiden samalla kuituhäviöt.

5.4.2 Syöttösakeus

Lajiteltavan massan ominaisuudet ovat myös merkittäviä tekijöitä lajittimen tehokkaan toiminnan kannalta, sillä massan syöttösakeus, viskositeetti, kuidunpituusjakauma, sekä lämpötila muokkaavat lajitteluprosessin hallintaa (Fredriksson, 1995). Massan syöt-

tösakeus on edellä mainituista massaominaisuuksista kriittisin, sillä se vaikuttaa lajittimen ajettavuuteen (Fredriksson, 1995). Syöttösakeutta säädetään laimentamalla massaa lisävedellä, jolla vältetään lajittimen tukkeutuminen (Hautala, et al., 2009, s. 288). Kuva 16 havainnollistaa kuitumassan todennäköisyyden kulkeutua akseptiin syöttösakeuden funktiona (Walmsley & Weeds, 2003). Kuten jo aiemmin mainittiin, läpivirtauksen heikentyminen tehostaa erottelutehokkuutta, joten alla olevasta kuvaajasta voidaan tehdä johtopäätös, että syöttösakeuden kasvattaminen parantaa lajittimen erottelutehokkuutta.



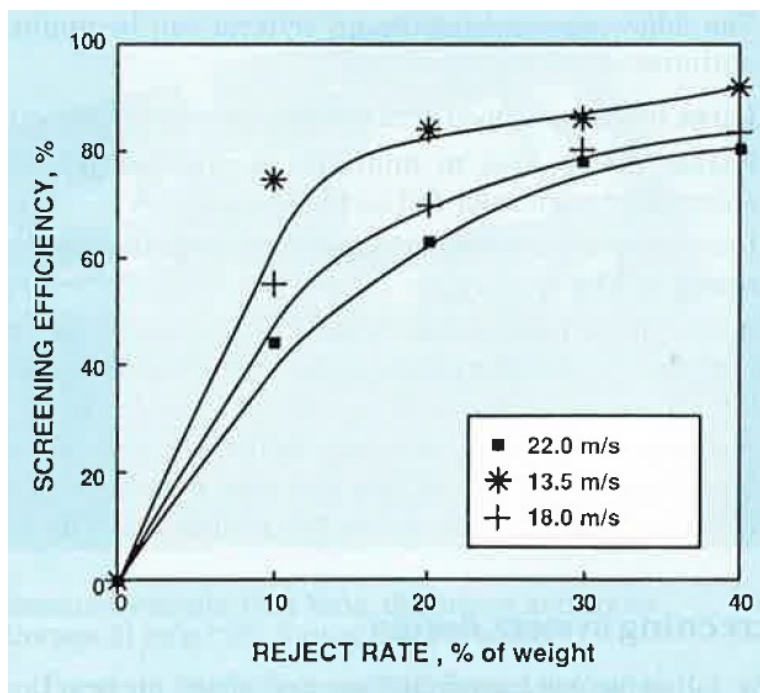
Kuva 16. Kuitumassan todennäköisyys päätyä akseptivirtaukseen syöttösakeuden funktiona. Kuvassa C_f tarkoittaa syöttösakeutta ja P_p todennäköisyyttä, jolla kuitumassa päätyy akseptivirtaan. (Walmsley & Weeds, 2003)

Syöttösakeuden ylläpitäminen sakeampana on erottelutehokkuuden kannalta järkevä vaihtoehto, sillä sakeamman massan lajittelu parantaa lajittimen erottelutehokkuutta (Gallagher, 1997). Ilmiö johtuu lisääntyneestä kuitujen välisestä interaktiosta, jonka takia sihtipinnan lävitse kulkeutuva massa vähenee (Dulude, 1994; Fredriksson, 1995; Niinimäki, et al., 1998). Silti liian suuri syöttösakeus lisää rejektin sakeutumista entisestään, jolloin lajitin menee helpommin tukkoon (Atkins, et al., 2005; Fredriksson, 1995).

5.4.3 Roottorin nopeus

Myös roottori on yksi lajittimen tärkeimmistä komponenteista, sillä se puhdistaa sihtirummun aukkoja sopivalla aikavälillä, mikä vähentää lajittimen pyrkimystä tukkeutua (Niinimäki, et al., 1996b). Lisäksi roottori luo sopivan turbulenttiset olosuhteet sihtirummun pinnan läheisyyteen, joka edistää kuitujen läpipääsyä orientoimalla kuidut aukkojen suuntaisesti (Fredriksson, 1995). Turbulenttisia virtausolosuhteita säädetään roottorin pyörintänopeutta muuttamalla (Hautala, et al., 2009, s. 294).

Lajittimen tukkeutumista ehkäistään kasvattamalla roottorin nopeutta, mikä samalla lisää lajittimen kapasiteettia (Atkins, et al., 2005). Useat tutkimukset ja kirjallisuusviitteet osoittavat, että hitaalla roottorinopeudella on selkeä korrelaatio lajittimen tukkeutumisen kanssa (Bennington & Kerekes, 1996). Kapasiteetin lisäys heikentää lajittimen erottelutehokkuutta, sillä ei-haluttujen partikkeleiden läpipääsy lajittimen akseptivirtaan helpottuu (Atkins, et al., 2005). Roottorinopeus tulee siten valita tasolle, jolla lajitinta pystytään operoimaan ilman tukkeutumista samalla ylläpitäen lajittimen normaali toiminta (Bliss, 1992b, s. 232). Yleisimmät roottorinopeudet pilotti- ja tehdaslajittimissa ovat matalasakeuslajittelussa 10 - 20 m/s luokkaa ja korkeasakeuslajittelussa 20 - 26 m/s luokkaa (Bliss, 1992b, s. 232). Kuva 17 esittää erottelutehokkuuden heikentymistä roottorinopeuden kasvattamisen johdosta (Heise, 1992).



Kuva 17. Painelajittimen erottelutehokkuus rejektisuhteen funktiona. Lisäksi vertailu käytettäessä erilaisia roottorinopeuksia, rakeleveys 0,30 mm. (Heise, 1992)

Niinimäki et al. (1999) esittävät tutkimuksensa tuloksissa sopivan pyörimisnopeuden roottorille. Johtopäätöksissään he tukevat ajatusta, että roottorin tärkein ominaisuus on luoda turbulenttiset olosuhteet sihtipinnalle, mutta samalla he varoittavat liiallisen turbulenssin aiheuttaman massan sekoittumista, mikä heikentää erottelua ja kasvattaa lajitimen energiankulutusta. He ehdottavat, että lajitimen roottorin pyörintänopeus tulisi valita sellaiselle tasolle, jolla ylläpidetään ainoastaan lajitimen häiriötön toiminta. Näin varmistetaan mahdollisimman hyvä lajittelutehokkuus ilman ylimääräistä sekoittumista.

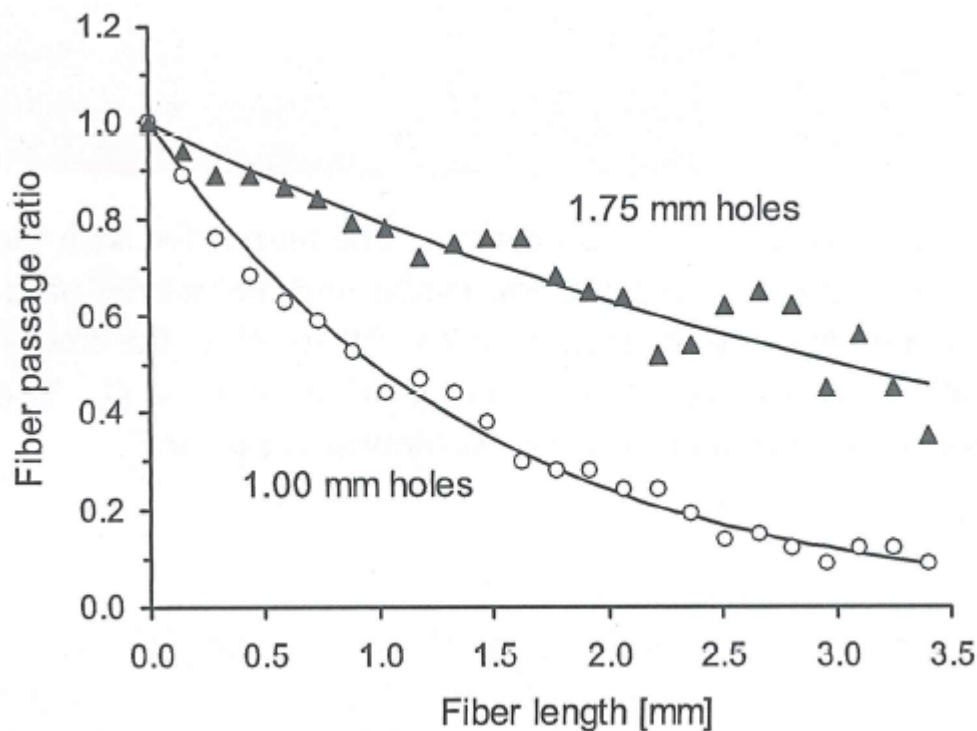
Schabel ja Respondek (1997) tutkivat fluidisaation vaikutusta partikkeleiden dimensioiden muuttumiseen. Tutkimuksesta ilmeni, että mitä enemmän massaa fluidisoidaan, sitä varmemmin epäpuhtaudet pirstoutuvat pienemmiksi palasiksi, jotka ovat hankalampia lajitella. Heidän tutkimuksensa tulokset vahvistavat edellä mainitut johtopäätökset, että roottorin pyörintänopeus tulee valita tasolle, jolla saadaan aikaan riittävä fluidisaatio ilman ylimääräistä sekoittumista.

5.4.4 Lajitteluaukon koko ja avoin pinta-ala

Lajittelutehokkuuteen vaikuttaa myös lajitteluaukon koko. Aukkokoon seuraamisen sijaan pyritään seuraamaan lajitimen avonaista pinta-alaa sekä aukossa tapahtuvaa virtausnopeutta (Dulude, 1994). Lajittimen avoin pinta-ala ja aukon virtausnopeus on todistettu korreloivan lajitimen kapasiteetin ja erottelutehokkuuden kanssa (Dulude, 1994). Lajittimen avoin pinta-ala ilmaisee erottelua varten käytettävien aukkojen yhteispinta-alan koko lajittelupintaan nähden (Gallagher, 1997, s. 21). Liian avonainen pinta-ala, toisin sanoen lyhyet aukkojen väliset etäisyydet, saattavat aiheuttaa lajitimen tukkeutumisvaaran (Gooding & Craig, 1992).

Lajittimen tukkeutuminen liian avonaisen pinta-alan johdosta on väistämätön tapahtuma lajiteltavan massan kuidunpituusjakauman keskipituuden ollessa suurempi kuin aukkojen välinen etäisyys (Gooding & Craig, 1992). Gooding ja Craig (1992) pystyivät todistamaan, että massan keskimääräisen kuidunpituuden ollessa n. 10 - 20 % pidempi kuin rakojen välinen etäisyys toisistaan lajitin tukkeutuu. Liian lyhyt välimatka mahdollistaa kuitujen kerääntymisen sihtipinnalle kahden raon välille muodostaen kuitumaton, joka vähentää läpivirtausta, mikä lopulta aiheuttaa tukkeutumisen (Gooding & Craig, 1992). Myös Heise (1992) sekä Jokinen et al. (2007) tutkivat kyseistä ilmiötä, ja päätyivät vastaavanlaisiin johtopäätöksiin. Sopivan avonaisella alalla, aukkojen välisellä etäisyydellä sekä aukkojen koolla voidaan lajitteluprosessi optimoida erittäin hyvälle erottelutasolle.

Aukkojen koko vaikuttaa moneen eri tekijään, kuten erottelutehokkuuteen, kuitumaton muodostumiseen laitteistossa sekä lajittelun selektiivisyyteen (Julien Saint Amand & Perrin, 1998). Heise (1992) pystyi osoittamaan omissa tutkimuksissaan, että rakonopeus on pääasiallinen lajitteluun vaikuttava tekijä. Rakonopeus kuvaa lajiteltavan sulpun virtausnopeutta lajitteluaukossa (Julien Saint Amand & Perrin, 1998). Lisäksi Heise osoitti, että rakonopeuteen vaikuttaa merkittävimmin lajittimen avoimen pinta-alan suuruus. Myös muut tutkimukset tukevat Heisen oletusta, että mitä suurempi pinta-ala, sitä suurempi rakonopeus pystytään havaitsemaan (Martinez, et al., 1999; Julien Saint Amand & Perrin, 1998). Kuten avoimen pinta-alan kasvattaminen, niin myös rakonopeuden kasvattaminen heikentää lajittelutehokkuutta ja lisää lajittimen kapasiteettia (Julien Saint Amand & Perrin, 1998). Kuva 18 esittää kuidun läpikulkusuhdetta kuidunpituuden ja lajitteluaukon koon funktiona (Krotscheck, 2006, s. 578). Kuvaajasta ilmenee selkeästi, että kapeampi aukko estää massan läpikulkua, minkä lisäksi pidemmillä kuiduilla on hankalampi läpäistä sihtipinta.



Kuva 18. Kuidun läpikulkusuhte kuitunpituuden ja lajitteluaukon koon funktiona. (Krotscheck, 2006, s. 578)

Edellä mainittu teoria ei siltikään ole täysin pitävä, kuten eräät tutkijat ovat tutkimuksissaan osoittaneet (Niinimäki, et al., 1998; Olson, et al., 2000). Jokinen et al. (2007) tutkivat lankarakosihtien profiilien korkeuksia sekä lankojen leveyksiä, verraten niiden vaiku-

tusta lajittelukapasiteettiin. Langan leveyden kavennus lisäsi lajittimen avointa pinta-alaa, minkä tulisi kasvattaa lajittimen kapasiteettia. Näin ei kuitenkaan aina käynyt, vaan eräissä tilanteissa lajittimen kapasiteetti laski, jonka tutkijat olettivat johtuvan kuitumaton muodostumisesta kahden tai useamman aukon välille.

Aukkojen koon suhteen pienentynyt aukko tehostaa puhdistusseulontaa samalla vähentäen laitteiston kapasiteettia (Gooding & Craig, 1992; Julien Saint Amand & Perrin, 2001; Heise, 1988; Niinimäki, et al., 1998; Olson, et al., 2000; Pemble, 1987). Puhdistusseulontaa tutkittaessa on todettu, että rakosihdit kykenevät puhdistamaan lajiteltavaa massaa paremmin kuin reikäsihdit (Julien Saint Amand & Perrin, 1998; Pemble, 1987). Sama on myös todettu toisessa tutkimuksessa, jossa rejektisuhteen arvo oli vakio, mikä edesauttaa tulosten vertailua (Liukkonen & Bengs, 2001).

5.4.5 Massan ominaisuudet

Lajitteluun vaikuttaa syöttösakeuden lisäksi lajiteltavan massan muut ominaisuudet, kuten massan kuidunpituusjakauma, lämpötila ja viskositeetti (Krotscheck, 2006, s. 577-579). Kuidunpituusjakaumalla on kohtalaisen suuri merkitys lajittelussa, sillä painelajittimien toiminta perustuu pituudenmukaiseen erotteluun (Braaten & Wakelin, 1999). Mitä pidempi kuidunpituusjakauma massalla on, sitä enemmän kuituja päätyy rejektiin ja sitä vaikeampaa on lajitteluprosessi hallita (Jokinen, et al., 2005).

Lajitteluprosessin hankaloituminen johtuu rejektin sakeutumisesta, jota ilmenee huomattavasti enemmän pidemmän kuidunpituusjakauman omaavilla massoilla kuin lyhyemmän kuidunpituusjakauman omaavilla massoilla (Wakelin & Corson, 1998). Lisäksi Jokinen et al. (2005) tutkivat kapeiden ja leveiden kuidunpituusjakaumien eroavaisuuksia. Heidän tuloksistaan ilmenee, että kapean kuidunpituusjakauman omaavat massat ovat vaikeampia lajitella, sillä kapeassa kuidunpituusjakaumassa erot kuidunpituuksien välillä ovat huomattavan pienet, jolloin lajittelu ei ole yhtä selkeää.

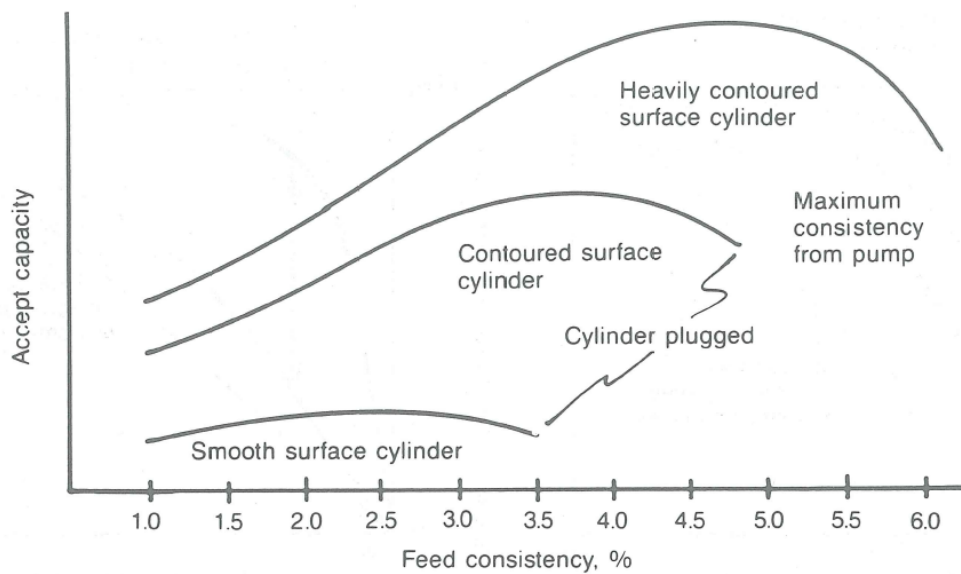
Viskositeetti ja lämpötila vaikuttavat samankaltaisesti lajitteluun, sillä massan viskositeetti on lämpötilasta riippuvainen (Krotscheck, 2006, s. 577). Lämpötilan nosto alentaa massan viskositeettia, jolloin kuitumassa käyttäytyy enemmän veden mukaisesti (Paul, et al., 1999). Viskositeetti ilmaisee fluidin kykyä vastustaa virtausta, joka johtuu kuitujen välisen interaktion ja sitoutumiskyvyn vähentymisestä (Paul, et al., 1999). Massan käyttäytyessä veden mukaisesti kuituflokkien muodostuminen lajittimen seulakorissa vähenee huomattavasti, mikä heikentää lajittelutehokkuutta (Paul, et al., 1999).

Paul et al. (1999) tutkivat myös viskositeettia muokkaavien aineiden, kuten karboksime-tyyliselluloosaan (CMC) hyödyntämistä lajitteluprosessissa. CMC on selluloosasta ja polymeeristä valmistettu puolisynteettinen yhdiste (Kloow, 2000, s. 265). Paul et al. (1999) tutkimuksesta ilmenee, että CMC:n käyttäminen parantaa lajittelutehokkuutta, joka johtaa puhtaampaan akseptiin. He olettivat tämän johtuvan lisääntyneestä kuitujen välisestä interaktiosta. Myös sihtipinnan läpäisyä ilmaiseva rakonopeus alentui CMC:tä käytettäessä (Paul, et al., 1999), minkä tiedetään johtavan parempaan lajittelutehokkuuteen (Gallagher, 1997, s. 29).

Schabel ja Respondek (1997) tutkivat kuinka lajittimien toiminta eroaa normaalista toiminnasta lajiteltaessa muovautumiskykyisiä epäpuhtauksia sisältävää massaa. Muovautumiskykyisillä epäpuhtauksilla tarkoitetaan partikkeleita, jotka kykenevät muuttamaan muotoaan siten, että partikkelit läpäisevät sihtipinnan aukot lajittelun aikana (Bliss, 1992b, s. 229-231). Muovautumiskykyisiä partikkeleita ovat erilaiset muovit sekä muut pehmeät partikkelit, jotka etenkin lämmön vaikutuksen alaisuudessa muokkautuvat dimensioidensa suhteen (Bliss, 1992b, s. 229-231).

5.4.6 Kapasiteetti

Lajittimen koko ei vaikuta muuhun kuin kapasiteettiin, eli mitä suurempi lajitin, sen enemmän massaa pystytään lajittelemaan (Gallagher, 1997, s. 17-19). Erilaiset sihtirummun pintaan tehdyt profiloinnit lisäävät turbulenssia sihtikorissa, mikä edesauttaa lajittelua, jolloin lajittimen kokonaiskapasiteetti kasvaa (Jokinen, et al., 2007). Kapasiteetin kasvattamisen sijaan profiloidut sihtipinnat luovat mahdollisuuden hyödyntää lajittimessa korkeampaa syöttösakeutta, mikä vähentää vaadittavaa pumppaamista (Jokinen, et al., 2007). Martinez, et al. (1999) tutkimuksesta ilmenee lajittimen kapasiteetin olevan riippuvainen sihtirummun avoimesta pinta-alasta. Myös sihtirummun kyky vastustaa kuitujen läpimenoa vaikutti lajittimen kapasiteettiin (Martinez, et al., 1999). Kuva 19 havainnollistaa lajittimen kapasiteetin massan syöttösakeuden funktiona (Bliss, 1992b, s. 237). Lisäksi kuvassa nähdään sihtipinnan profiloinnin vaikutus kapasiteettikykyyn.

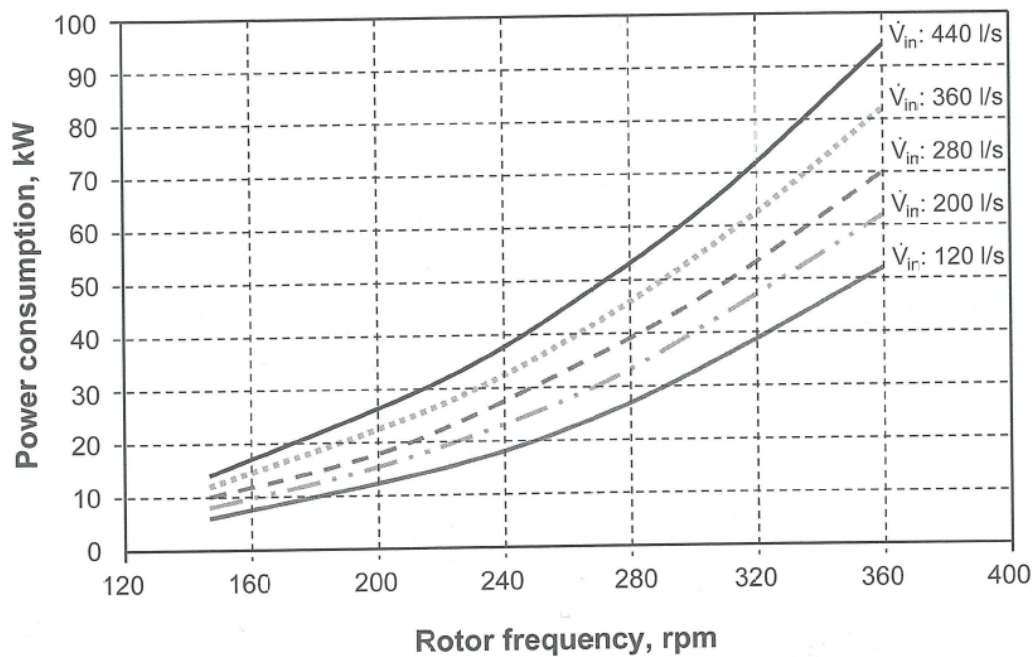


Kuva 19. Lajittimen kapasiteetti massan syöttösakeuden funktiona. (Bliss, 1992b, s. 237)

Yleisesti voidaan olettaa, että kapasiteetin kasvattaminen heikentää lajittelutehokkuutta. Silti vastaväitteitä kyseiselle ilmiölle on havaittu (Dulude, 1994). Dulude esittääkin omis- sa pohdinnoissaan, että virtausnopeuden lisäyksestä johtuva kapasiteetin lisäys ei heiken- nä erottelutehokkuutta vaan pikemmin parantaa sitä. Silti, kyseinen ilmiö on oletettu ole- van lajitin- ja prosessikohtainen, minkä johdosta sitä ei ole pystytty todentamaan muissa tutkimuksissa.

5.5 Energiankulutus

Painelajittimet käyttävät energiaa lajiteltavan massan fluidisoimiseksi (Julien Saint Amand & Perrin, 2001). Fluidisaation aikaansaamiseksi lajittimessa on pyörivä roottori. Roottorinopeuden lisääminen johtaa väistämättä lisääntyneeseen energiankäyttöön. Li- säksi massavirtauksen lisääminen kasvattaa roottorin energiankulutusta (Hautala, et al., 2009, s. 306-307). Kuva 20 esittää painelajittimen energiankulutuksen roottorinopeuden funktiona (Hautala, et al., 2009, s. 308). Lisäksi kuvaajasta nähdään tilavuusvirtauksen lisäämisestä johtuva lisääntynyt energiankulutus.



Kuva 20. Painelajittimen energiankulutus roottorinopeuden funktiona. (Hautala, et al., 2009, s. 308)

Tutkijat (Olson, et al., 2004) suosittelevat, että painelajitinta suunniteltaessa ja rakennettaessa tulisi huomioida lajittimen sisä- ja roottoripintojen virtaviivaisuus, jolloin energiaa ei kulu hukkaan epätasaisuuksien takia. Lisäksi he toteavat, että mitä suurempi kiinteärunkoinen roottori on, sitä enemmän energiaa kuluu sen pyörittämiseen. Tästä syystä painelajittimien roottorit tulisi mieluiten varustaa siivekkein, sillä kyseiset roottorit vaativat vähemmän energiaa niiden pyörintäliikkeen ylläpitämiseksi. Myös siivekkeen etäisyys roottorin keskustasta vaikuttaa energiankulutukseen, sillä etäisyyden kasvu lisää lajittimen energiankulutusta.

5.6 Yhteenveto

Lajitteluprosessiin ja sen erottelutehokkuuteen vaikuttaa monet tekijät. Tekijät lajitellaan kolmeen ryhmään; laitteisto-ominaisuudet, prosessin ajoparametrit sekä massaominaisuudet. Laitteisto-ominaisuuksiin sisältyy laitteiston koko, sihtirummun malli, roottorin rakenne sekä syöttötapa. Laitteisto-ominaisuudet suunnitellaan ylläpitämään valittu tuotantokapasiteetti. Lisäksi laitteisto tulee suunnitella energiatehokkaaksi ja mahdollisimman yksinkertaiseksi. Taulukko 2 kuvaa laiteominaisuuden kasvattamisesta johtuva muutos painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa sekä energiankulutuksessa.

Taulukko 2. Laiteominaisuuden kasvattamisesta johtuva muutos painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa ja energiankulutuksessa.

Laiteominaisuuden kasvattaminen	Lajittimen kapasiteetti	Lajittimen erottelutehokkuus	Energiankulutus
Lajittimen koko	+	-	+
Avoim pinta-ala	+	-	-
Siivekkeen pituus	-	+	+
Siivekkeen leveys	+	-	+
Siivekkeen etäisyys sihtipinnasta	-	+	0

*) + = ominaisuus kasvaa, 0 = ominaisuus ei muutu, - = ominaisuus vähenee laiteominaisuuden kasvattamisen seurauksena

Edellä mainitun taulukon (2) lisäksi, painelajittimen sihtirumpu, roottori ja syöttötapa ovat valittavia ominaisuuksia. Myös nämä ominaisuudet muuttavat lajittimen kapasiteettia, erottelutehokkuutta ja energiankulutusta.

Taulukko 3 kuvaa lajittimen kapasiteetin, erottelutehokkuuden ja energiankulutuksen riippuvuutta laiteominaisuuksien valinnan suhteen.

Taulukko 3. Laiteominaisuuden valinnasta johtuva muutos painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa sekä energiankulutuksessa.

Laiteominaisuuden vaikutus	Lajittimen kapasiteetti	Lajittimen erottelutehokkuus	Energiankulutus
<i>Sihtirumpu</i>			
Reikä vs. rako vs. kiilalanka	+ / - / +	- / + / -	+ / - / +
Sileä vs. profiili	- / +	+ / -	- / +
<i>Roottori</i>			
Kiinteä vs. siiveke	+ / -	- / +	0 / +
Suora vs. kartio	0 / +	0 / -	+ / -
<i>Syöttötapa</i>			
Tangentiaalinen vs. aksiaalinen	+ / -	0	+ / -

*) + = ominaisuus kasvaa, 0 = ominaisuus ei muutu, - = ominaisuus vähenee laiteominaisuuden valinnan seurauksena

Prosessin ajoparametreja ovat rejektisuhde, syöttösakeus, roottorin pyörintänopeus ja virtausnopeus. Ajoparametreilla pyritään ylläpitämään tasaista ja tehokasta lajitteluprosessia. Ajoparametrit ovat lajittimen tärkeimmät tekijät, sillä lajitinta hallitaan operointiparametrien avulla. Taulukko 4 kuvaa operointiparametrin kasvattamisesta johtuvaa muutosta painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa ja energiankulutuksessa.

Taulukko 4. Operointiparametrin kasvattamisesta johtuva muutos painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa ja energiankulutuksessa.

Operointiparametrin kasvattaminen	Lajittimen kapasiteetti	Lajittimen erottelutehokkuus	Energiankulutus
Rejektisuhde	-	+	+
Roottorin pyörintänopeus	+	-	+
Massan syöttösakeus	-	+	-
Sihtiaukon virtausnopeus	+	-	-
Laimentaminen	-	+	+

*) + = ominaisuus kasvaa, 0 = ominaisuus ei muutu, - = ominaisuus vähenee operointiparametrin kasvattamisen seurauksena

Massaominaisuuksiin kuuluu massan sakeus, kuidunpituusjakauma, lämpötila sekä viskositeetti. Massaominaisuuksiin vaikuttamalla voidaan helpottaa lajittimen toimintaa, esim. jauhamalla luodaan laajempi kuidunpituusjakauma, mutta menetelmää hyödynnetään harvoin, sillä se vaikuttaa samalla myös muihin osaprosesseihin. Taulukko 5 ilmaisee massaominaisuuden kasvattamisesta johtuvaa muutosta painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa ja energiankulutuksessa.

Taulukko 5. Massaominaisuuden kasvattamisesta johtuva muutos painelajittimen kapasiteetissa, erottelutehokkuudessa ja energiankulutuksessa.

Massaominaisuuden kasvattaminen	Lajittimen kapasiteetti	Lajittimen erottelutehokkuus	Energiankulutus
Kuidunpituusjakauma	-	-	0
Lämpötila	+	-	+
Viskositeetti	-	+	-
Muovautumiskyky	+	-	0

*) + = ominaisuus kasvaa, 0 = ominaisuus ei muutu ja - = ominaisuus vähenee massaominaisuuden kasvattamisen seurauksena.

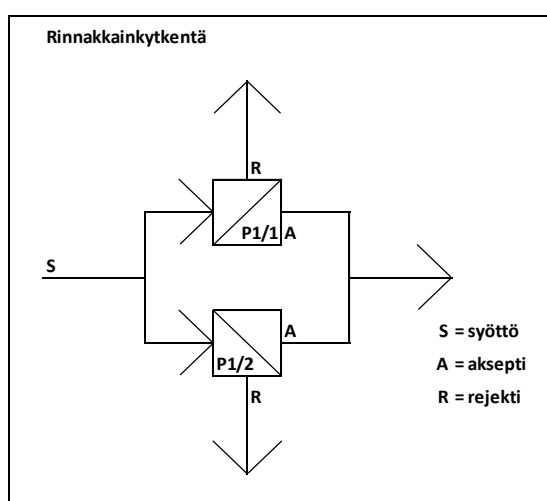
6 LAJITTAMOKYTKENNÄT

Lajittamot koostuvat monesta eri lajittimesta ja puhdistimesta. Riippuen sekä prosessista että lopputuotteen vaatimuksista lajittamo voi koostua ainoastaan painelajittimista, pyörrepuhdistimista tai näiden kombinaatioista (Gallagher, 1997, s. 26-34). Lajittamokytkentöjä on monenlaisia, mutta pääsääntöisesti lajittamokytkentöjä tarkastellaan kolmen peruseriaatteen mukaan; rinnakkain, sarjaan sekä kaskadiin kytketyt lajittimet (Hautala, et al., 2009, s. 308-309).

Yksivaiheisessa lajitteluprosessissa on ainoastaan yksi lajitin, joka erottelee syöttövirran kahteen erilliseen virtaan, akseptiin ja rejektiin (Gallagher, 1997, s. 27). Tarvittaessa rejekti voidaan uudelleenohjata takaisin lajittimen syöttövirtaukseen, jolloin minimoidaan järjestelmän kuituhäviöt. Samalla se kuitenkin luo lajittamolle akkumuloitumisongelman, joka voi aiheuttaa lajittimien tukkeutumisen lisääntyneen syöttömassan johdosta (Gallagher, 1997, s. 30-33).

6.1 Rinnakkainkytkentä

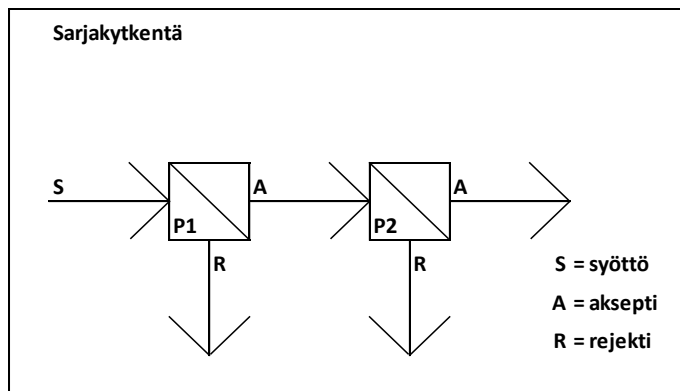
Rinnakkainkytkennässä lajittimille johtava massavirtaus jaetaan lajittimien välillä. Lajitteluprosessin jälkeen sekä aksepti- että rejektivirtaukset kaikilta lajittimilta yhdistetään luoden näin yhden yhtenäisen aksepti- ja rejektivirtauksen. Rinnakkainkytkennän tarkoituksena on kasvattaa lajittamolinjan kapasiteettia lisäämällä lajittelulaitteita. Rinnakkainkytkentöjä käytetään huomattavasti enemmän pyörrepuhdistinratkaisuisissa, sillä pyörrepuhdistimet ovat varsin pienikokoisia laitteita painelajittimiin verrattuna. (Tervola, et al., 2011, s. 438-439) Kuva 21 havainnollistaa rinnakkainkytkennän kahden lajittimen välillä.



Kuva 21. Rinnakkainkytkentä kahden lajittimen välillä.

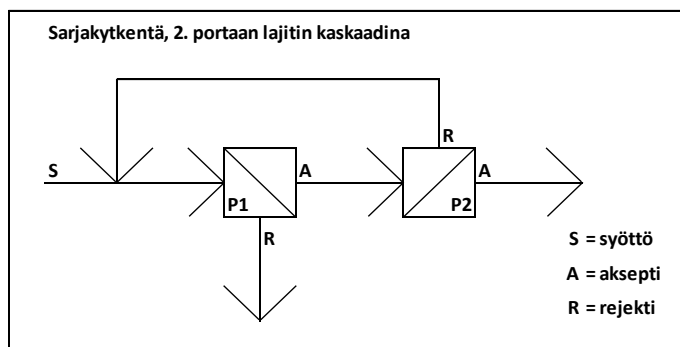
6.2 Sarjakytkentä

Sarjakytkennässä lajittimet tai puhdistimet kytketään sarjaan, jolloin massavirtaus johdetaan ensin ensimmäiseen laitteeseen, josta laitteen akseptivirtaus johdetaan toiseen laitteeseen seuraavaa lajittelua varten (Gallagher, 1997, s. 33-34). Sarjakytkennässä ensimmäisen vaiheen aksepti lajitellaan uudemman kerran, missä tavoitteena on parantaa ensimmäisen lajitteluvaiheen puhdistustulosta entisestään (Gallagher, 1997, s. 33-34). Laitteiden rejektivirtaukset voidaan prosessinohjauksesta riippuen joko yhdistää tai pitää erillään. Kuva 22 havainnollistaa sarjakytkennän kahden lajittimen välillä.



Kuva 22. Sarjakytkentä kahden lajittimen välillä.

Lisäksi sarjakytkennässä voidaan ohjata toisen lajittimen rejekti takaisin ensimmäisen lajittimen syöttövirtaan, jolloin rejekti lajitellaan uudemman kerran (Tervola, et al., 2011, s. 434-435). Menetelmällä minimoidaan kuituhäviöt, mutta samalla järjestelmään akkumuloituu rejektiä, joka ei poistu järjestelmästä, mikä saattaa johtaa lajittimen tukkeutumiseen. Kuva 23 havainnollistaa sarjakytkennän kahden lajittimen välillä, joissa toisen vaiheen rejekti ohjataan uudelleen lajittelukierto.



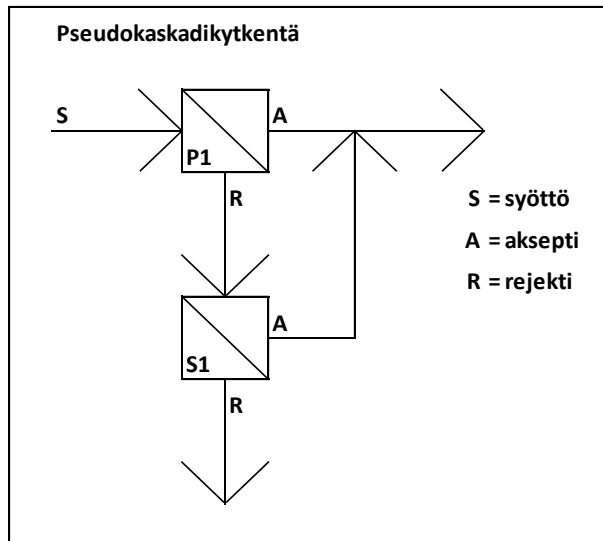
Kuva 23. Sarjakytkentä kahden lajittimen välillä, toisen vaiheen lajittimen rejekti ohjataan uudelleen lajitteluun.

Sarjakytkennän etuna on tehokkaampi erottelukyky (Gallagher, 1997, s. 33-34). Lisäksi lajittamolinjan kapasiteettia voidaan lisätä lajiteltaessa ensin karkeasti ja sitten hienosti (Tervola, et al., 2011). Huomionarvoista on, että toisessa erotteluvaiheessa tulisi hyödyntää pienempää aukkokokoa, sillä se parantaa lajittelutehokkuutta entisestään (Gallagher, 1997, s. 33-34). Tosin vastaväitteitäkin löytyy, sillä Schabel (1998) osoitti omassa tutkimuksessaan, ettei lajittelutehokkuus heikentynyt merkittävästi käyttäessä samankokoisia rakoja kaikissa lajitteluvaiheissa.

6.3 Kaskadikytkenä

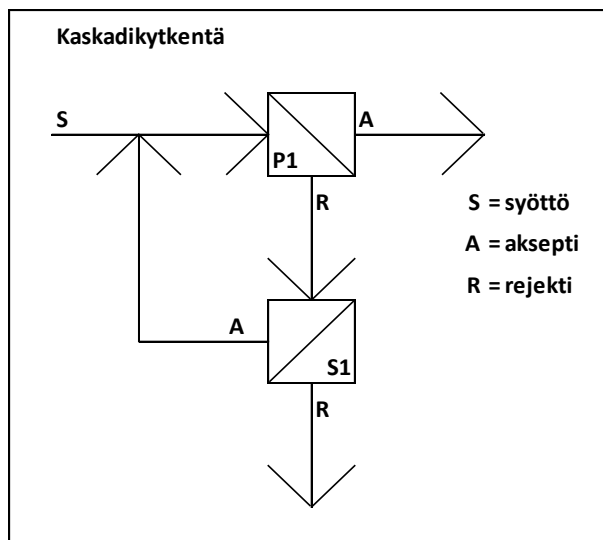
Kaskadikytkenässä toiseen vaiheeseen syötettävä massavirta on ensimmäisen vaiheen rejektivirta, kun sarjakytkennässä lajiteltiin akseptivirta uudemman kerran. Rejektivirran uudelleensihtauksella pyritään minimoimaan ensimmäisen vaiheen kuituhäviöstä johtuva kuitujen menetys (Gallagher, 1997, s. 30-33). Toisin sanoen toisen portaan lajitin pyrkii säilyttämään sitoutumiskykyiset kuidut prosessin massavirtauksessa ja poistamaan epäpuhtaudet mahdollisimman tarkasti. Kaskadikytkenän hyötyjä ovat kuituhäviöiden minimointi ja erottelutehokkuuden parantuminen puhtausnäkökulmasta (Gallagher, 1997, s. 30-33). Haittatekijöitä ovat lisälaitteiston hankinta- ja käyttökustannukset sekä ylimääräiset prosessiohjaukset. (Eck, et al., 1985)

Kaskadikytkenässä on mahdollista käyttää kahta eteenpäin syöttävää menetelmää. Toiselta lajittimelta tuleva akseptivirta voidaan joko ohjata eteenpäin yhdessä ensimmäisen lajittimen akseptivirran kanssa, pseudokaskadikytkenä, tai ohjata taaksepäin, jolloin toisen vaiheen akseptivirta yhdistyy ensimmäisen vaiheen syöttövirtaan, kaskadikytkenä (Gallagher, 1997, s. 30-33). Kuva 24 havainnollistaa pseudokaskadikytettyä lajitinjärjestelmää.



Kuva 24. Pseudokaskadikyt kentä, jossa toiseen portaan lajittimen aksepti ohjataan ensimmäisen vaiheen akseptivirtaan.

Kuvan 24 tilanteessa järjestelmän kokonaiskapasiteettia kasvatetaan, mutta samalla ensimmäisen lajitteluvaiheen akseptin laatu heikentyy toisen vaiheen akseptin tasolle (Gallagher, 1997, s. 30-33). Laadun heikentyminen johtuu toisen vaiheen suhteellisesti suuremmasta epäpuhtausmäärästä, jolloin epäpuhtauksien todennäköinen määrä akseptissa kasvaa (Bliss, 1992b, s. 245). Kuva 25 havainnollistaa kaskadikytetyn lajitinjärjestelmän.



Kuva 25. Kaskadikyt kentä, jossa toisen portaan lajittimen rejekti ohjataan ensimmäisen vaiheen syöttövirtaan.

Kuvan 25 tilanteessa aiheutuu ongelma, kun lajitinkierto on akkumuloitunut massaa, joka ei poistu lajittelukierrosta rejektinä tai akseptina (Gallagher, 1997, s. 30-33). Tämä lisää lajittimeen syötettävän massan määrää ja syöttösakeutta, mikä voi johtaa lajittimen tukkeutumisen (Gallagher, 1997, s. 30-33).

Heise (1992) päätteli omassa tutkimuksessaan, että suuri osa kaskadikytkeistä lajitteista on huonosti suunniteltuja, sillä kaskadikytkennoissa ilmenevä takaisinsyöttö kasvattaa lajittimeen syötettävän massan määrää. Heisen mukaan useimmat lajititimet tukkeutuvat tällöin, koska ne ovat alimitoitettuja. Alimitoitus johtuu kaskadijärjestelmästä, joka on jätetty huomioimatta suunniteltaessa syötettävän massan määrää sekä rejektin osuutta syötettävässä massavirrassa. Heise ehdottaakin, että lajiteltu rejekti tulisi poistaa järjestelmästä niin pian kuin suinkin, ettei järjestelmä kierrätä rejektiä turhaan.

6.4 KytKentämallien eroavaisuudet

Edellä mainitut kytKentämallit eroavat toisistaan merkittävästi, sillä riippuen kytKentätavasta menetelmässä joko lajitellaan aksepti- tai rejektivirta uudemman kerran. Lisäksi kierrättävät järjestelmät tuovat lisää vaihtoehtoja kytKentämallin valintaan. Useat tutkimukset (Allison & Olson, 2000; Eck, et al., 1985; Fredriksson, 1984; Hill, et al., 1979) ovat osoittaneet, että kierrättävät järjestelmät parantavat lajittamon erottelutehokkuutta. Lisäksi kaskadijärjestelmän etuna on kuituhäviöiden minimointi verrattuna muihin vaihtoehtoihin (Allison & Olson, 2000). SarjakytKentämalleissa kuituhäviön suuruus on kaikkein suurin, sillä rejektille ei suoriteta uudelleenlajittelua (Allison & Olson, 2000). SarjakytKentämallien kuituhäviöongelmaa voidaan torjua muuttamalla sihtikorien tyyppejä sekä aukkokokoja lajitinvaiheiden välillä (Allison & Olson, 2000; Fredriksson, 1984).

Schabel (1998) painotti, että takaisinsyöttävän järjestelmän hyödyt nousevat parhaiten esille tapauksissa, joissa lajiteltavan massan laatu vaihtelee huomattavasti. Kyseisissä tilanteissa Schabel ehdottaa monivaiheisen, kaskadikytketyn lajitinjärjestelmän hyödyntämistä, jotta saavutetaan mahdollisimman puhdas akseptijae.

6.5 KytKentöjen optimointi

Lajittelu kuluttaa huomattavan määrän energiaa, jolloin lajittamokytKentöjä tehtäessä tulisi perehtyä lajittimien sekä lajittamokytKentän energiatehokkuuteen. Useat lajitinkierto on kohdistuneet parannusprojektit pyrkivät poistamaan turhat välivarastot ja pumput prosessista (Gallagher, 1997, s. 38). Välivaiheiden poistaminen vähentää huomattavasti käyttö- ja pääomakustannuksia (Gallagher, 1997, s. 38). Hawkes (1990) ja Hooper (1984) pohtivat omissa artikkeleissaan kustannusleikkauksista saatavia hyötyjä ja mahdollisuuksia

sia. Molemmat päätyivät samaan johtopäätökseen, että lajittimet ja niiden väliset kytkennät tulisi teettää mahdollisimman yksinkertaisiksi. Tällä tavoin säästetään laitteiston käyttö- ja huoltokustannuksissa, minkä lisäksi pääomakustannusten vähentyminen synnyttää lisäsäästöjä. Myös Hourula et al. (1996) päätyivät vastaavanlaiseen suositukseen optimoitaessa lajittamoita.

Osassa tutkimuksia (Henricson, et al., 1989; Javid, 1983) on perehdytty lajittamoiden sijaintiin massakierrossa. Jokainen prosessikokonaisuus, jossa ilmenee pumppaamista, roottorin pyörintäliikettä tai muunlaista kineettistä energiaa, aiheuttaa painepulsseja massavirtaukseen. Painesykykset massavirrassa aiheuttavat häiriöitä prosessilaitteiden toimintaan. Useat tutkimukset tukevat johtopäätöstä, sillä esimerkiksi perälaatikossa ilmenevät painesykykset ovat johtaneet lopputuotteen neliöpainoeroihin (Henricson, et al., 1989; Pinon, et al., 2003). Lisäksi Pinon et al. (2003) tutkivat kuinka massan sakeus vaikuttaa painesykyksen syntymiseen. Tutkimustulosten perusteella sakeampi massa vähentää painesykyksen voimakkuutta huomattavasti tehokkaammin kuin matalan sakeuden massa.

7 REJEKTIN KÄSITTELY

7.1 Yleistä

Rejekti on lajittimelta poisseulottua massaa, joka ei sovellu paperin- ja kartonginvalmistukseen. Pääsääntöisesti rejekti sisältää paljon epäpuhtauksia, kuten kuorenpalasia, tikkuja, kuituflokkeja, muovipalasia, värjääviä pigmenttipartikkeleita, hiekkaa, säiliöiden tai putkien pinnoiteainesta sekä muita epäpuhtaita partikkeleita, joita ei luokitella kuiduiksi. (Kraft & Orender, 1993; Ochoa de Alda, 2008)

Epäpuhtaudet aiheuttavat sekä ajettavuus- että laatuongelmia paperi- ja kartonkikoneilla (Heise, 1992). Ajettavuusongelmat ilmenevät sitoutumattomina partikkeleina kuituverkostossa, jotka saattavat puristua irti paperirainasta paperikoneen puristinosalla, mikä saattaa aiheuttaa ratakatkon koneella (Hautala, et al., 2009, s. 284). Ajettavuusongelmia voi myös ilmetä myöhemmissä jatkojalostusprosesseissa, jolloin paperin- ja kartonginvalmistaja kohtaa asiakkaiden tekemiä tuoterekламаatioita (Mäkinen, 2014; Stolt, 2014). Rejektin aiheuttamat laatupoikkeamat liittyvät erityisesti lopputuotteen visuaaliseen ulkonäköön, jossa kuorenpalaset sekä värjäävät ainekset vähentävät etenkin valkaistun paperin laatua (Ochoa de Alda, 2008).

7.2 Rejektinhallinta

Rejektin poistaminen lajitteluprosesseista on nykyisin käytetyin prosessinhallintamenetelmä (Gallagher, 1997, s. 34). Massakierrosta poistamisella on kuitenkin haittatekijänsä, sillä lajittelun aikana rejektivirtaan ohjautuu epäpuhtauksien lisäksi huomattava määrä sitoutumiskelpoista kuituainesta (Gallagher, 1997, s. 34). Kuitujen poistamista lajittelun yhteydessä kuvataan kuituhäviöksi. Kuituhäviöstä johtuen monessa lajitteluprosessissa rejektinkäsittely optimoidaan siten, että saavutettaisiin maksimaalinen rejektin erottelutehokkuus mahdollisimman vähin kuituhäviöin (Gallagher, 1997, s. 26).

Optimiratkaisu, joka mahdollistaa riittävän erottelutehokkuuden vähäisin kuituhäviöin, vaatii usein monivaiheisen lajittamon, jossa yhdistetään lajittimia ja puhdistimia (Gallagher, 1997, s. 30-35). Kuten jo lajittamokytkennöistä kertovassa kappaleessa mainittiin, lajittelujärjestelmän kuituhäviöt minimoidaan yhdistelemällä useita lajitteluvaiheita, joissa alkuperäinen rejekti kierrätetään useaan otteeseen lajittamovaiheiden lävitse. Hyödyntämällä erikokoisia aukkoja sekä erilaisia sihtejä voidaan lajittamo optimoida hyvälle tasolle rejektinhallinnan kannalta (Eck, et al., 1985). Lisäksi massan lajittelu tulee suorittaa siinä prosessivaiheessa, jossa syntyy tai ilmenee eniten epäpuhtauksia (Heise,

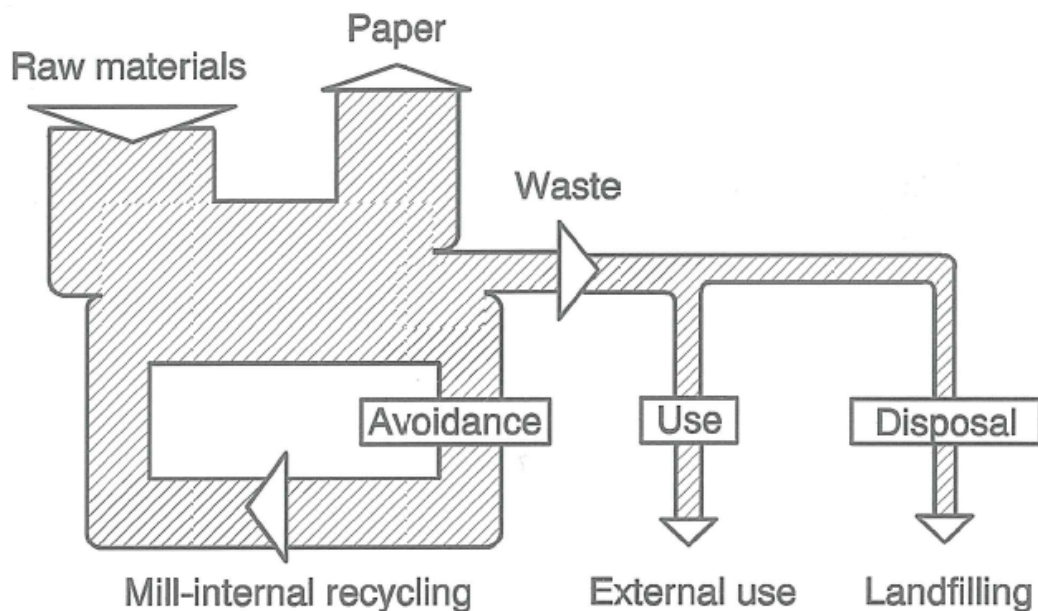
1990). Näin epäpuhtauksista päästään eroon varhaisessa vaiheessa ja vältetään ylimääräiseltä lajittelulta sekä kustannusten kasvulta (Heise, 1990).

Rejekiä voidaan periaatteessa lajitella ja puhdistaa niin monta kertaa, että erottelutehokkuus lähenee täydellistä erotusta, mutta samalla on myös otettava huomioon lajitteluprosessin kustannustehokkuus (Gallagher, 1997, s. 30-33). Ochoa de Alda (2008) osoitti tutkimuksessaan, että neljännessä lajitteluvaiheesta lähtien kuituhäviöiden minimointi ei ole kannattavaa toimintaa.

7.3 Rejektin hyötykäyttö

Tehdasprosesseissa muodostuva rejekti voidaan hyödyntää monin eri tavoin ja eri tarkoituksiin. Alustavasti rejektihallintaprosessissa pyritään hyödyntämään rejekiä mahdollisimman paljon raaka-aineena itse valmistettavaan lopputuotteeseen. Tämän ollessa mahdollonta on rejektille mietittävä toissijaisia käyttökohteita. Rejektijätettä voidaan hyödyntää joko muissa osaprosesseissa, kuten raaka-aineena tai polttoaineena, tai sitten se kelpaa ainoastaan täyttömaaksi. (Hamm, 2000, s. 509, 511-512)

Kuva 26 kuvaa yksinkertaista rejektihallintakaaviota tehdasprosessissa (Hamm, 2000, s. 509).



Kuva 26. Yksinkertainen kaavio rejektijätteen hallinnasta tehdasprosesseissa. (Hamm, 2000, s. 509)

7.3.1 Hyötykäyttö valmistusprosessissa

Paperi- ja kartonkikoneilla, missä lievät epäpuhtaudet eivät aiheuta ongelmia tuotteen loppulaatuun, voidaan rejekti hyödyntää valmistusprosessissa (Haikkala, et al., 1994). Tällöin on otettava huomioon, että epäpuhtauksien partikkelikoko ei ylitä tiettyä raja-arvoa, joka voisi aiheuttaa ratakatkon tai vaurioita prosessilaitteelle (Ochoa de Alda, 2008). Etenkin eräille valkaisuamattomille kartonkilaaduilla on tyypillistä jättää lajittelu-prosessissa syntynyt rejekti massakiertoon (Haikkala, et al., 1994; Stolt, 2014). Rejekti voidaan ohjata uudelleen jauhamisvaiheeseen, missä rejektin partikkelikoko pienenee (Gallagher, 1997, s. 35). Pienentynyt partikkelikoko päättyy lopulta akseptiin, mutta menetelmällä on ongelmansa, sillä rejektin joukossa kulkeutuu myös kiviainesta ja muuta metallista ainesta aiheuttaen prosessilaitteiden kulumista ja laitevaurioita (Haikkala, et al., 1994).

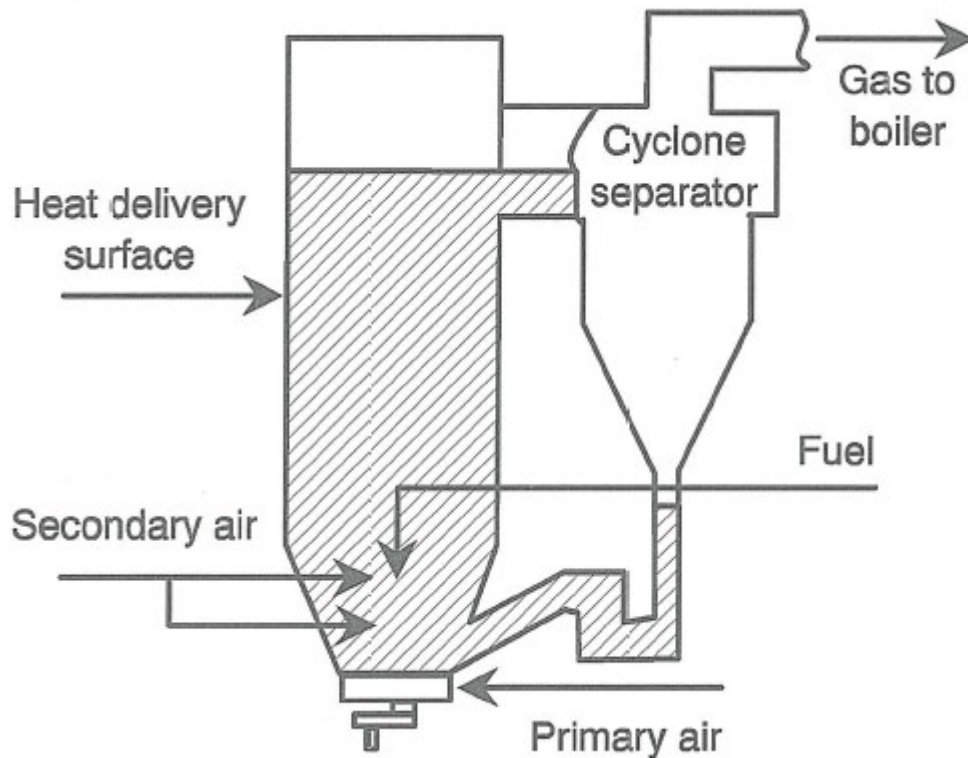
Lisäksi rejektin uudelleenkäyttömahdollisuuksia vähentää lopputuotteen käyttökohde ja vaatimukset. Elintarviketeollisuuden paperi- ja kartonkituotteisiin käytettävän raaka-aineen laatu on tarkoin säädeltyä (Laakso & Rintamäki, 2003, s. 25-26), jolloin rejektiksi luokiteltava massajae harvemmin kelpaa kyseisen lopputuotteen raaka-aineeksi. (Ochoa de Alda, 2008). Kiertokuitumateriaalin tulee olla riittävän puhdasta, etenkin väriltään, jotta sitä voitaisiin hyödyntää paperin- tai kartonginvalmistuksen raaka-aineena (Ochoa de Alda, 2008).

7.3.2 Hyötykäyttö polttoaineena

Rejekti voidaan hyödyntää polttoaineena höyrykattiloissa, joissa pystytään polttamaan kosteuspitoista polttoainetta energiaksi. Leijukerroskattilat tai leijupetikattilat on kehitetty hyödyntämään kyseisiä biologisia polttoaineita kattilan polttoprosessissa. (Kraft & Orender, 1993; Ochoa de Alda, 2008)

Leijupetikattiloissa tulipesää hallitaan kattilan sisään puhallettavan ilman avulla, joka nostattaa kattilan sisällä olevan hiekan, tuhkan sekä poltettavan polttoaineen leijumaan sopivalle korkeudelle. Leijuva peti sekoittuu jatkuvasti, mikä tehostaa polttoaineen palamisprosessia. Palamisprosessissa syntyy lämpöenergiaa, jota hyödynnetään kattilaveden tulistamiseen höyryksi. Polttotekniikan ansiosta kattilassa pystytään myös polttamaan kosteutta sisältävä orgaaninen aines, joka ei muutoin suostuisi palamaan riittävän tehokkaasti. Polttamiseen kelpaavan aineksen tulee olla mahdollisimman pienessä partikkelikoossa, jotta polttoaine pystytään ylläpitämään leijunnassa. (Hamm, 2000, s. 522-524)

Kuva 27 esittää polttoainetta kierrättävän leijupetikattilan rakenteen sekä toimintaperiaatteen (Hamm, 2000, s. 523).



Kuva 27. Polttoainetta kierrättävän leijupetikattilan toimintaperiaate. (Hamm, 2000, s. 523)

Vuonna 2009 säädetty EU-direktiivi 406/2009/EY mukaan Euroopan unionin alueella tulisi uusiutuvien energianlähteiden määrää kasvattaa 20 %, energiankulutusta vähentää 20 % ja kasvihuonepäästöjä vähentää 20 % vuoteen 2020 mennessä (Euroopan unionin virallinen lehti, 2009). EU:n direktiiviasetuksen johdosta Euroopan unionin sisällä on pyritty edistämään uusiutuvien luonnonvarojen hyödyntämistä energiantuotannossa (Hamm, 2000, s. 602-606). Puu on materiaalina uusiutuva luonnonvara, niin sanottua biomassaa, joka sitoo itseensä ilmakehän hiilidioksidia kasvun aikana (Hamm, 2000, s. 606). Puuhun sitoutunut hiilidioksidi vapautuu takaisin ilmakehään polttoprosessissa (Hamm, 2000, s. 606). Menetelmää kutsutaan hiilidioksidineutraaliksi, sillä ylimääristä hiilidioksidia ei polttoprosessin aikana muodostu (Hamm, 2000, s. 606).

Polttoaineen kosteuspitoisuus vaikuttaa saavutettavaan lämpöarvoon. Mitä kosteampi tuote, sitä enemmän energiaa kuluu kosteuden poistamiseen ennen kuin puhdas palamisreaktio saavutetaan (Huhtinen & Hotta, 2008, s. 200-201). Tästä johtuen biopolttoaineiden kuivien ja kosteiden lämpöarvojen erot ovat huomattavat (Huhtinen & Hotta, 2008, s.

200-201). Taulukko 6 esittää yleisimmin käytettyjen polttoaineiden lämpöarvoja sekä suhteellisia kosteuspitoisuuksia (Hamm, 2000, s. 520; Huhtinen & Hotta, 2008, s. 199, 203). Erityisen huomionarvoista on rejektin suhteellisen korkea kostea polttoarvo, mikä johtuneee rejektin sisältämisestä muovi- ja muista epäpuhtauspartikkeleista (Hamm, 2000, s. 520).

Taulukko 6. Polttoaineiden lämpöarvot sekä suhteelliset kosteuspitoisuudet. (Hamm, 2000, s. 520; Huhtinen & Hotta, 2008, s. 199, 203)

Polttoaine	Kosteuspitoisuus (%)	Lämpöarvo, kuiva (MJ/kg)	Lämpöarvo, kostea (MJ/kg)
<i>Fossiiliset polttoaineet</i>			
Kivihiili	9,0	28,8	26,0
Polttoöljy, raskas / kevyt	0,3 / 0,01	40,9 / 43,0	40,8 / 43,8
Maakaasu	-	49,2	49,2
<i>Biopolttoaineet</i>			
Puu	55,0	19,1	7,25
Kuori, mänty/kuusi/koivu	60,0 / 60,0 / 55,0	20,0 / 18,6 / 22,7	6,5 / 6,0 / 9,0
Mustalipeä, mänty / koivu	40,0 / 40,0	14,6 / 13,8	7,8 / 7,3
Turve	50,0	20,8	9,2
<i>Jätepolttoaineet</i>			
Rejekti (märkä)	25,0 - 50,0	-	16,0 - 23,0
Bioliete (märkä)	70,0 - 85,0	-	7,0 - 9,0

Linderothin (1989) teettämän tutkimuksen mukaan polttamiseen ohjattavan rejektijätteen kiintoainepitoisuuden ollessa noin 25 %, polttamisesta saatava lämpöhyöty on mitäänsanomaton. Lisäksi eräissä tilanteissa teoreettinen lämpöhyöty oli negatiivinen, eli rejektin polttamiseen kuluu enemmän energiaa kuin mitä siitä saadaan lämmitysenergiaa. Polttamiseen käytettävä rejekti tulisi sen sijaan kuivattaa korkeampaan kiintoainespitoisuuteen, noin 50 % kuiva-ainepitoisuuteen (Linderoth, 1989), että siitä olisi hyötyä energiantuotannossa. (Kraft & Orender, 1993; Linderoth, 1989).

Rejektin vedenpoistoon ja kuivattamiseen liittyviä menetelmiä on useita, joista yleisimmät vedenpoistoon liittyvät menetelmät ovat täryseula- ja puristinratkaisut (Kraft & Orender, 1993). Täryseulan toimintaa kuvailtiin tarkemmin kappaleessa 4.3.2. Täryseulan jälkeinen rejekti on edelleen kosteata, joten vesi pyritään poistamaan puristamalla rejektiä joko suotokankaan tai puristinruuvien avulla (Hamm, 2000, s. 516). Eräissä puristinratkaisuissa on mahdollista esikuivattaa rejektiä lisäämällä puristimeen höyryä (Hamm, 2000, s. 517).

Kuivattamisprosessit ovat joko suoria, lämmönjohtuvuudesta riippuvia, tai epäsuoria, lämmönsiirrosta johtuvia. Molemmissa menetelmissä pyritään lämpöenergian avulla haihduttamaan vettä rejektistä. Pääsääntönä voidaan olettaa, että mitä kosteampi ja hienompi rejektijae on kyseessä, sitä enemmän vedenpoistoon ja kuivattamiseen liittyviä osaprosesseja rejektin kuiva-ainepitoisuuden kasvattamiseen tarvitaan. Samalla polttoaineen kuivattamisprosessin energiankulutus kasvaa, mikä heikentää polttoaineesta saatavaa lämpöarvoa. (Hamm, 2000, s. 517-518)

Polttoprosessin tehostamiseksi rejekti sekoitetaan usein muun kiinteän polttoaineen sekaan, jotta saavutetaan riittävät lämpö- ja palamisominaisuudet leijupetikattilan normaalia toimintaa varten (Hamm, 2000, s. 530). Käytetyimmät kiinteät polttoaineet, joihin rejekti yhdistetään, ovat puukuori ja turve (Kraft & Orender, 1993). Polttoprosessin hallitsemiseksi puukuoresta pyritään poistamaan mahdollisimman paljon kosteutta (Kraft & Orender, 1993).

Biolietteen tai rejektin hyödyntäminen leijupetikattilassa ei ole pelkästään kuiva-ainepitoisuudesta riippuvainen. Sekä bioliete että rejekti sisältää huomattavan määrän tuhkaa sekä muita haitallisia yhdisteitä, kuten rikkiä ja typpeä (Kraft & Orender, 1993; Linderöth, 1989). Näiden epäpuhtaiden yhdisteiden polttaminen muodostaa epäpuhtaita savukaasuja, mikä hankaloittaa savukaasujen puhdistamista (Hamm, 2000, s. 525-526).

7.3.3 Muita käyttökohteita

Riippuen rejektin koostumuksesta, rejekti voidaan joko kompostoida, hyödyntää maanviljelyslannoitteena tai sementin ja tiilien raaka-aineena (Hamm, 2000, s. 536-538, 541). Kompostointi ei ole mahdollista kaikille rejekti- ja jätejakeille, etenkin jos ne sisältävät muoveja, lasia ja muita epäpuhtauksia (Hamm, 2000, s. 536). Sen sijaan rejektin sisältämä orgaaninen aine kompostoituu ajan myötä ja kompostoinnista saatavaa mineraalipitoista multaa voidaan käyttää maanparannusaineena erilaisissa kohteissa (Hamm, 2000, s. 535).

Viimeisenä vaihtoehtona rejektin hyötykäytölle on rejektin hyödyntäminen täyttömaana (Gallagher, 1997, s. 34). Menetelmä ei suoranaisesti kuvaa hyötykäyttöä, sillä kyseessä on viimeisin keino poistaa rejekti tehtaan jätevesistä (Hamm, 2000, s. 542). Rejektin painavimmat fraktiot ja epäorgaaniset yhdisteet saadaan eroteltua jätevesistä vasta puhdistuslaitoksen myöhemmissä vaiheissa, jolloin niitä voidaan hyödyntää pelkästään täyttömaana (Ochoa de Alda, 2008). Lisäksi epäorgaanisten yhdisteiden polttaminen on myös todettu olevan ympäristölle vaarallista (Gallagher, 1997, s. 34), sillä polttamisen yhteydessä muodostuu monia karsinogeenia sekä muita haitallisia yhdisteitä (Hamm, 2000, s. 525-526).

7.4 Yhteenveto

Lajittelussa muodostuvalle rejektille löytyy useita hyötykäyttökohteita, joista uudelleen käyttö, polttaminen ja hyödyntäminen muissa prosesseissa raaka-aineena ovat hyödyllisimmät. Rejektin soveltuvuus uudelleenkäytettäväksi paperinvalmistuksessa riippuu sekä valmistusprosessin vaatimuksista että rejektin koostumuksesta. Rejektin sisältäessä huomattavan määrän haitallisia epäpuhtauksia on rejekti parempi poistaa paperinvalmistuksen massakierrosta kokonaan.

Rejektin hyödyntäminen höyryvoimatuotannossa on yksi varteenotettavimmista keinoista, sillä se on kustannustehokas ratkaisu, etenkin suuremmissa tuotantolaitoksissa, joissa pystytään polttamaan biopolttoaineita. Lajittelu rejektiä kutsutaan usein biopolttoaineeksi, koska se sisältää huomattavan määrän orgaanista aineista, vaikka osa sen koostumuksesta sisältää epäorgaanisia yhdisteitä.

Viimeisenä vaihtoehtona on käyttää rejektiä täyttömaana. Kyseisessä menetelmässä rejektiä ei jalosteta, vaan se käytetään sellaisenaan. Rejektin koostumus vaikeuttaa sen hyödyntämistä täyttömaana, sillä epäorgaaniset yhdisteet voivat olla ympäristön kannalta vaarallisia. Edellä mainituista syistä johtuen rejektinhallinnan osalta on pyrittävä mahdollisimman kustannustehokkaaseen ratkaisuun, missä minimoidaan rejektin käsittelyssä syntyvät jätemäärät sekä ilmanpäästöt.

8 KIRJALLISEN OSAN YHTEENVETO

Aallotuskartongin valmistusprosessissa olevat epäpuhtaudet eivät suoranaisesti vaikuta lopputuotteen laatuongelmiin. Aallotuskartonki on valkaisuamatonta kartonkia, minkä lisäksi sen loppukäyttökohde on tyypillisimmin aaltopahvirakenteen keskellä, jolloin sille ei aseteta ulkonäöllisiä vaatimuksia. Epäpuhtaudet aiheuttavat enemmän ongelmia aallotuskartongin ajettavuuteen, minkä takia lajittelu- ja puhdistinvaiheelle on tarvetta aallotuskartongin valmistuksessa. Tärkeintä aallotuskartongin valmistuksessa on materiaalihyötysuhteen maksimointi, jolloin lajitteluvaiheen päällimmäisenä tavoitteena on tuottaa mahdollisimman tasalaatuista massaa minimaalisin kuituhäviöin.

Massanvalmistuksen yhteydessä keitetty massa pestään, jauhetaan, lajitellaan sekä puhdistetaan ennen kuin se kelpaa käytettäväksi paperikoneella. Lajittelu- ja puhdistusvaiheet voidaan sijoittaa massanvalmistuksen osaprosessien välille tai loppuun. Lajittelun ja puhdistuksen tarkoituksena on poistaa massasta epäpuhtauksia, jotka ovat peräisin raaka-aineista tai valmistusprosesseista. Lisäksi prosessissa pyritään välttämään kuituhäviöiden muodostumista. Lajittelulla ja puhdistamisella pystytään myös suojaamaan paperikoneen herkkiä osia, kuten perälaatikkoa ja viiraosaa, mekaaniselta kulumiselta.

Lajittelua varten on kehitetty monta erillistä laitetta, joista painelajitin on yleisimmin käytössä. Painelajittimen toimintaan vaikuttaa lajittimen rakenne- ja operointiominaisuudet sekä lajiteltavan massan ominaisuudet. Rako- ja kiilalankalajittimet soveltuvat paremmin puhdistamaan massaa epäpuhtauksista, kun reikälajittimet soveltuvat paremmin fraktiointiin. Roottorin muodolla on selkeä yhteys lajittimen kapasiteettiin ja erottelutehokkuuteen. Myös massan ominaisuudet vaikuttavat lajittelun toimintaan. Tärkeimpiä seurattavia suureita ovat painelajittimen rejektisuhde, lajiteltavan massan syöttösakeus ja roottorin nopeus.

Lajittamokytkentöjä optimoimalla hallitaan massanlajittelun erottelutehokkuutta. Lajittamon tärkein tehtävä on tuottaa tasalaatuista massaa. Lajittamot voivat koostua joko painelajittimista, pyörrepuhdistimista tai näiden yhdistelmistä. Lisäksi painelajittimet voidaan varustaa erilaisin sihtikorein, mikä edistää erottelutehokkuutta minimoiden kuituhäviöt.

Myös lajittelun rejektinhallinta on tärkeä osa-alue lajittelutekniikassa rejektin sisältäessä paljon epäpuhtauksia, joiden käsittely vaatii ylimääräisiä resursseja. Optimoimalla rejektin muodostumismäärä, voidaan rejektille valita sopiva viimeistelyprosessi. Rejektin poistaminen valmistusprosessista mahdollistaa rejektin hyödyntämisen muissa prosesseissa, kuten muunlaisten tuotteiden raaka-aineena tai polttoaineena höyryvoimalaitoksessa.

KOKEELLINEN OSA

9 JOHDANTO

Työn kokeellisessa osassa tarkastellaan Heinolan Flutingtehtaan kartonkikoneen konelajittelua. Työn tavoitteena on löytää optimaalinen prosessiratkaisu konesihtien rejektin käsittelylle. Työ on jaettu kolmeen osioon; rejektin koostumuksen analysoiminen, nykyisen lajitteluvaiheen toimivuuden selvittäminen sekä vaihtoehtoisten prosessiratkaisujen tarkasteleminen. Vaihtoehtoisia prosessiratkaisuja varten työssä suoritetaan tehdasmittakaavaiset koeajot.

Rejektin koostumuksen, ennen kaikkea muovipartikkeleiden esiintymisen, selvittäminen on erittäin tärkeää. Rejektin muovilajikkeiden tunnistaminen ja rejektin muovipitoisuus vaikuttavat vaihtoehtoisten prosessiratkaisujen kehittämisessä. Tunnistuksen tavoitteena on selvittää prosessissa esiintyvä muovikomponentit sekä tutkia muovin käyttäytymistä prosessiolosuhteissa, kuten sellunkeitossa. Lisäksi selvitetään rejektin soveltuvuutta polttoaineena höyryvoimalaitoksessa.

Tehdasmittakaavaisissa kokeissa tutkitaan Heinolan Flutingtehtaan kartonkikoneen lajittamoa sekä vaihtoehtoisia prosessiratkaisuja rejektinhallintaa varten. Koeajojen tavoitteena on löytää optimaalinen prosessiratkaisu kartonkikoneen lajitteluprosessille, millä rejekti voitaisiin poistaa massankierrosta kokonaan. Hypoteesina rejektin poistolle on, että lopputuotteen visuaalinen ilme ja kartonkikoneen ajettavuus paranee.

Työn viimeisessä osiossa tarkastellaan lajittamoprosessin uudistamista vaihtoehtoisten prosessiratkaisujen kautta, missä päätavoitteena on löytää mahdollisimman kustannus-
tehokas prosessiratkaisu.

Rejektin uudelleenkäyttöön on päädytty, koska aallotuskartongissa näkyvät epäpuhtaudet eivät ole asiakasnäkökulmasta ongelmatekijöitä (Stolt, 2014). Asiakasnäkökulmasta katsottuna tärkeämpiä laatutekijöitä ovat aallotuskartongin lujuusominaisuudet ja kosteuden-sietokyky.

Edellä mainituista syistä johtuen rejektin kierrättäminen jauhatusprosessin kautta on erittäin hyvä vaihtoehto lajitteluvaiheen kuituhäviöiden minimoimiseksi. Menetelmän haittapuolena ovat järjestelmään kerääntyvät epäpuhtaudet, jotka aikanaan rikkoutuvat pienemmiksi partikkeleiksi jauhinterien välillä päätyen lopulta lopputuotteeseen. Lisäksi jauhinterien kuluminen on aiheuttanut ennenaikaisia terienvaihtoja, minkä on oletettu johtuvan rejektin kierrättämisestä.

Kuten jo kirjallisessa osiossa esitettiin, ei uudelleenkierrätys ole aina kaikkein paras menetelmä hallita lajittimien rejktiä. Monissa tapauksissa rejektin akkumuloituminen järjestelmään on omiaan luomaan muita ongelmia, kuten ajettavuusongelmia kartonki- ja aaltopahvikoneilla. Tästä johtuen on päädytty tutkimaan voidaanko nykyinen rejektinhallintaprosessi muuttaa toisenlaiseen prosessiratkaisuun, joka olisi samanaikaisesti sekä kustannustehokas että lopputuotteen kannalta järkevä vaihtoehto.

10.2 Tutkimuskysymykset

Kirjallisen osion tarkoituksena oli alustaa kokeellista osaa tutkimuskysymyksillä. Heinolan nykyinen prosessitilanne tiedostaen päädyttiin selvittämään seuraavat asiat:

- Rejektin koostumus
 - o Mitä rejektisihdin rejektivirtaus sisältää?
 - o Onko rejektillä positiivinen lämpöarvo?
- Sihtirummun valinta
 - o Miten hyvin nykyiset painelajittimet toimivat?
 - o Voidaanko massa puhdistaa paremmin kiilalankasihtejä käyttämällä?
- Kolmas lajitteluvaihe
 - o Onko kolmannesta lajitteluportaasta hyötyä Heinolan prosessissa?
 - o Kuinka kolmannen portaan lajitteluvaihe tulisi suunnitella?
- Vaihtoehtoiset prosessiratkaisut
 - o Miten rejektinhallinta tulisi suorittaa Heinolan Flutingtehtaalla?
 - o Huomataanko koeajojen aikana syntyviä eroja aallotuskartongin ajettavuudessa tai laadussa?

11 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

11.1 Yleistä

Koeajojen suunnitteluvaiheessa tuli selvittää, kuinka lajitteluprosessin toimivuutta voitaisiin mitata käytännönläheisesti ja riittävän tarkasti. Vastaavissa kirjallisuustöissä on määritetty massan yleisominaisuuksia, kuten sakeus, suotautumiskyky, keskimääräinen kuidunpituus, kuitufraktiot, puhtaus, jne. Puhtauden määrittämiseen liittyy silti perustavanlaatuinen ongelma, koska määrittäminen riippuu tekijästä ja välineistä, joita määrittäessä käytetään.

11.2 Epäpuhtauksien mittaaminen

Epäpuhtauksien mittaamista varten on kehitetty monenlaisia roskanmäärittäystestejä ja standardimenetelmiä (Putz, 1999, s. 83-84). Tunnetuimmat standardoidut roskanmäärittäysmenetelmät ovat TAPPI T 213, TAPPI T 437, DIN 54362-1 sekä ISO 5350 (Putz, 1999, s. 83). Suurin osa määrittämisistä perustuu käsimmärittäykseen, mutta alalle on kehitetty laaja valikoima vaihtoehtoisia menetelmiä, jotka perustuvat suurimmaksi osaksi optisten analyysointilaitteiden käyttöön (Hill, et al., 1975). Optisten menetelmien kasvava osuus perustuu online-mittauksien suorittamiseen, jolloin paperi- tai kartonkikoneella pystytään jo itse valmistusvaiheessa löytämään kuituradasta defektit ja epäpuhtaudet (MacLeod & Kempf, 1977; Hill, et al., 1975).

11.2.1 Online-mittaukset

Online-mittarit ovat prosessiin kytkettyjä optisia laitteita, joiden tarkoituksena on tutkia joko massaa tai paperirataa, jotta löydetäisiin mahdolliset defektit ja muut epäpuhtaudet radasta (Putz, 1999, s. 83). Online-mittareiden avulla pystytään havaitsemaan epäpuhtaudet sekä vaivattomasti että nopeasti (Putz, 1999, s. 83-84). Lisäksi epäpuhtausmäärien ollessa erittäin korkeat, voidaan kyseinen epäpuhtauksia sisältävä osa radasta poistaa jatkojalostusprosesseissa, jotta epäpuhtauksia ei ilmenisi valmiissa lopputuotteessa (MacLeod & Kempf, 1977; Hill, et al., 1975).

Online-mittarin hyötyjä ovat laitteen objektiivisuus ja helppokäyttöisyys (MacLeod & Kempf, 1977), sillä kyseinen laite ei vaadi suurempia huoltotoimenpiteitä. Lisäksi laitteet kykenevät evaluoimaan paperi- tai sellunäytteen paljon tarkemmin kuin ihmissilmä (Putz, 1999, s. 83). Hill et al. (1975) osoittivat, että hyödyntämällä optista kameraa massan kuvaamiseen pystyttiin lajittelujärjestelmän erottelutehokkuutta optimoimaan entistä lyhyemmällä tarkastelujaksolla kuin laboratoriomenetelmin.

Silti vastaväitteitä löytyy, sillä Macleod ja Kempf (1977) tutkimuksessa ilmeni erittäin suurta hajontaa sekä optisilla että käsin suoritettavilla määrittäyksillä, mikä viittaa heidän mukaansa tilastollisesti epäluotettavaan määrittämiseen.

11.2.2 Laboratoriomittaukset

Laboratoriomittaukset ovat käsin tehtäviä määrittäyksiä, joissa hyödynnetään standardeissa määritettyjä ohjeita (Putz, 1999, s. 83). Käsin suoritettuihin määrittäyksille on ominaista, että ne ovat hyvin riippuvaisia määrittäyksen tekijästä, jolloin laboratoriossa suoritettuihin roskamäärittäysmittauksiin tulisi aina suhtautua epäilevästi (Putz, 1999, s. 83). Subjektiiivisuus aiheuttaa liian paljon virhearviointoja pelkästään muutaman näytteen välillä, minkä lisäksi koemäärittäyksiä on erittäin harvoin pystytty jäljittelemään tilastollisesti merkittävällä tasolla (Hill, et al., 1975; Putz, 1999, s. 83).

Vaikka laboratoriossa suoritettujen roskamäärittäysten tiedetään olevan epäluotettavia ja epätarkkoja määrittäysten subjektiiivisuuden takia, niitä pidetään silti kaikkein tehokkaimpina tapoina arvioida prosessiin kohdistuvia muutoksia. Jo pelkästään silmämääräinen havainto ennustaa prosessissa tapahtuvasta muutoksesta, sillä epäpuhtausaste vaihtelevat huomattavasti pelkästään rejektisuhteen muuttuessa. (Hill, et al., 1975; MacLeod & Kempf, 1977)

11.2.3 Yhteenveto

Epäpuhtauksia mitataan, jotta saadaan käsitys kuinka roskapitoinen valmistettu paperi- tai kartonkirulla on. Epäpuhtauksia mitattaessa laboratoriossa on otettava huomioon inhimillisestä tekijästä johtuvat eroavaisuudet sekä virhearvioinnit. Laboratoriossa suoritettujen roskamäärittäykset ovat vaikeasti toistettavia, mikä luo epäluotettavan kuvan määritettävästä suureesta. Silti laboratoriossa suoritettujen määrittäykset ovat hyvin yleisiä, sillä ne ovat kaikkein yksinkertaisimpia ja kustannustehokkaimpia menetelmiä määrittää massan ja lopputuotteen roskapitoisuus.

Online-mittaukset ovat kasvattaneet suosiotaan etenkin paperivalmistuksen parissa, missä epäpuhtauksista halutaan kokonaan eroon. Online-mittauksilla pystytään reagoimaan riittävän nopeasti valmistettavan tuotteen roskaisuuteen. Samaa tietoa pystytään myös hyödyntämään myöhemmässä vaiheessa paperirullien valmistuksessa, esim. suuren epäpuhtausalueen poistamiseen asiakasrullien leikkausvaiheessa.

11.3 Menetelmät

Puhtausmäärittelyyn liittyvän lyhyen selosteen perusteella on tässä diplomityössä päädytty hyödyntämään laboratoriossa suoritettavaa käsimittausmenetelmää. Kyseiseen menetelmään päädyttiin, koska Heinolan Flutingtehtaalla ei ole hyödynnettävänä online-mittaria massan puhtautta varten. Lisäksi massan ominaisuuksia mitattiin automaattisilla analysaattoreilla, mutta niiden tuloksia ei esitetä tarkemmin tämän työn puitteissa.

Kaikista koepisteistä määritettiin sakeus, suotautumiskyky sekä roskapitoisuus. Lisäksi osasta koepisteistä määritettiin tilavuusvirtaus ja kuitujakaumat. Taulukossa 7 on lueteltu määriteltävät ominaisuudet, standardit sekä menetelmät, millä esitetyt ominaisuudet määritettiin.

Taulukko 7. Määritettävät ominaisuudet, standardit ja menetelmät.

Määritettävä ominaisuus	Standardi	Menetelmä
Tilavuusvirtaus	-	Paikallismittari
Sakeus	SCAN-C 17:64, sovellettu	Laboratorio
Suotautumiskyky	SCAN-C 21:65, sovellettu	Laboratorio
Roskapitoisuus	TAPPI T 213, sovellettu	Laboratorio
Kuitujakauma	SCAN-CM 6:05	Laboratorio

11.3.1 Tilavuusvirtaus

Tilavuusvirtaus määritettiin paikallisesti asennettujen mittareiden avulla. Virtausmittausta ei voitu suorittaa jokaiselle koepisteelle puuttuvien anturipisteiden takia. Mittareiden oletettiin osoittavan todellista virtausta, jonka takia niitä ei kalibroitu koeajoja varten.

11.3.2 Sakeus

Sakeus määritettiin Heinolan Flutingtehtaan laboratorio-ohjeiden mukaisesti. Menetelmä perustuu SCAN-C 17:64 standardiin, josta poikettiin seuraavasti; suodatusta varten käytettiin kaksinkertaista silkkiseulakangasta, massakakkujen paistamista varten käytettiin imukartonkia ja kuivatusta varten lämpölevyn pintalämpötila pidettiin n. 220 - 240 °C. Sakeusmäärittystä käytettiin rejektisuhteiden laskentaan sekä suotautumiskyky- ja arkkinäytteiden valmistamiseen. Jokaisen koepisteen sakeus määritettiin vähintään kolmella rinnakkaismäärittelyksellä.

11.3.3 Suotautumiskyky

Suotautumiskyky (Canadian Freeness) määritettiin Heinolan Flutingtehtaan laboratorio-ohjeiden mukaisesti. Menetelmä perustuu SCAN-C 21:65 standardiin, josta poikettiin

seuraavasti; näytteen laimentamista varten käytettiin tehtaan raakavettä. Suotautumiskyvyllä arvioitiin painelajittimien toimintaa. Jokaisen koepisteen suotautumiskyky määritettiin vähintään kolmella rinnakkaismäärityksellä.

11.3.4 Roskapitoisuus

Roskapitoisuus määritettiin TAPPI T 213 standardin mukaan, josta poikettiin seuraavasti; pienimmän laskentaan huomioitavan roskapartikkelin kooksi määritettiin $0,25 \text{ mm}^2$ ja laskennallisesti ilmoitettiin roskien lukumäärä neliometriä kohden. Edellä valittu pienin laskentaa varten havaittava roskapartikkelikoko perustuu valmistettavan tuotteen laatuvaatimuksiin. Roskien lukumäärää neliometrillä käytettiin painelajittimen erottelutehokkuuden selvittämiseksi. Jokaisen koepisteen roskapitoisuus määritettiin vähintään kymmenellä rinnakkaismäärityksellä.

Määritystä varten tehdyt käsiarkit valmistettiin SCAN-CM 26:99 standardin mukaisesti, missä neliöpainona käytettiin 100 g/m^2 . Käsiarkin neliöpaino poikkeaa standardista, koska arkkien suotautuminen arkkimuotin lävitse osoittautui liian hankalaksi painavammissa neliöpainoissa. Lisäksi standardista poikettiin seuraavasti; arkinmuodostuksen lämpötilaa ei voitu säätää $20 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$:een, arkin huopauttamista varten käytettiin telaa, arkkien puristus suoritettiin kertaalleen ja arkkien kuivatus suoritettiin kuivausrummulla, jonka pintalämpötila oli n. 65 °C .

11.3.5 Kuitujakauma

Kuitujakauma määritettiin SCAN-CM 6:05 standardin mukaan. Heinolan NSSC-massan lajittelua varten käytettiin viirakokoja 30, 50, 100 ja 200. Standardista poiketen käytettiin 5 g absoluuttisen kuivaa massaa, koska massakakkujen suotautuminen Bauer-McNett-laitteen suppiloiden pohjasta osoittautui hankalaksi standardipainolla.

Kuitujakaumaa käytettiin osoittamaan lajittimen toiminta sekä todentamaan miten kuitujakaumat vaihtelevat lajitteluvaiheiden välillä. Kuitujakauma määritettiin ainoastaan viimeisimmän lajitinvaiheen massavirroista, koska haluttiin selvittää minkä kuitujakauman massaa lajiteltiin rejektiin ja täten myös kuituhäviöksi. Valittujen koepisteiden osalta kuitujakauma määritettiin vähintään kahdella rinnakkaismäärityksellä.

12 REJEKTIN KOOSTUMUS

12.1 Yleistä

Rejektin mahdollinen hyödyntäminen erilaisissa prosesseissa raaka-aineena riippuu rejektinäytteen koostumuksesta, minkä lisäksi rejektin hyödyntäminen menetelmänä tulee olla mahdollisimman kustannustehokasta. Etenkin laitoksissa, joissa hyödynnetään kierrätyspohjaista kuitumateriaalia, sisältää rejektivirta kuitujen ja puuaineksen lisäksi huomattavan määrän epäpuhtauksia, kuten muoveja, pigmentti- ja väriaineita

Muovia voi joutua kartonginvalmistusprosessiin monella eri tavalla. Osaan tavoista voidaan vaikuttaa, kun taas toiset johtuvat kartonginvalmistuksessa käytettävistä materiaaleista. Kuivatusviirat ja päänvientinarut on tehty muovista, joista irtoaa palasia tai nauhoja, mitkä saattavat päätyä kartonkikoneen hylkyjärjestelmään, mikä on osa kartonkikoneen massakiertoa. Muut muovinlähteet ovat pitkälti työnteossa käytettävistä työkaluista irtoavia palasia, kuten muovisten puukkojen kädensijat, haravanvarret, jne. Kyseisten välineiden päätymistä hylkyjärjestelmään pyritään välttämään niin hyvin kuin suinkin on mahdollista.

Rejektin lämpöarvo kuvaa rejektin polttamisesta saatavaa hyötyä. Lämpöarvo määritettiin, jotta saataisiin selville rejektin poltosta saavutettava kustannushyöty. Heinolan Flutingtehtaan yhteydessä oleva höyryvoimalaitoksen primäärikattilassa voidaan polttoaineena käyttää turvetta, kuorimolla syntyvää kuorijätettä, purulietettä, kivihiiltä sekä öljyä. Edellä mainituista polttoaineista käytetyin on turve, jonka sekaan lisätään kuorta ja lietettä. Öljyä ja kivihiiltä käytetään ainoastaan apupolttoaineena, jolla varmistetaan riittävän lämmitysteho.

12.2 Rejektin vaihtoehtoiset käyttökohteet

Osana tämän diplomityön tavoitteita on tarkastella, minkälaisia vaihtoehtoja kartonkikoneen rejektille on. Heinolan Flutingtehtaan osalta vaihtoehtoisia käyttökohteita rejektille on rejektin uudelleenjauhaaminen, uudelleenkeittäminen, polttoaineena hyödyntäminen ja täytemaaksi joutuminen. Riippuen hyödynnettävästä prosessista on ymmärrettävä kuinka rejektin sisältämät epäpuhtaudet käyttäytyisivät kyseisessä prosessissa.

Uudelleenjauhannassa rejektipartikkelit pirstoutuvat pienemmiksi päätyen lopulta akseptiin. Koska kyseinen menetelmä on jo nyt käytössä Heinolassa, ei menetelmää analysoida sen enempää. Sen sijaan on mietitty rejektin kierrättämistä massankeittoprosessin kautta, jolloin pystyttäisiin minimoimaan kuituhäviöitä tehokkaammin. Hakkeenpesun yhteydes-

sä painavammat muovijakeet päätyvät purulietteeseen ja kuitupitoinen rejekti sekä kevyet muovipartikkelit päätyvät normaaliin keittoprosessiin ja lopulta akseptiksi kartonkikoneelle. Kuitujen kierrätys takaisin prosessiin vähentää kuituhäviöitä.

Kierrättämällä rejekti keittoprosessin kautta rejektipartikkelit altistuvat keittoprosessissa vallitseville olosuhteille. Keitto-olosuhteista merkittävin on keittimen korkea lämpötila, n. 190 °C, mikä saattaa aiheuttaa muovipartikkeleiden sulamisen keittimessä keittoprosessin aikana. Heinolassa haketta keitetään keittimestä riippuen n. 20 - 30 minuuttia keittolämpötilan ollessa 190 °C tietämällä. Keitinpaineen ei oleteta vaikuttavan muovipartikkeliin merkittävästi.

12.3 Muovipartikkelit ja niiden vaikutus Heinolan prosessissa

Edellisessä kappaleessa mainittujen syiden perusteella suoritettiin lyhyt katsaus Heinolan kartonkikoneen luona käytetyistä muovisista välineistä ja materiaaleista, jotka saattaisivat tavalla tai toisella päätyä osaksi massan kiertojärjestelmää. Heinolan kartonkisalın tyypillisimmän muovilähteet ovat;

- Kuivatusviiran palaset
- Päänvientinaru
- Henkilösuojaimet
 - o Turvalasit
 - o Kertakäyttöiset korvatulpat
 - o Viiltosuojakäsineet / Käsineet
- Normaaliin työntekoon liittyvät apuvälineet
 - o ”Lusa”
 - o Puukko, varsi muovia
 - o Keränvaihtonaru
 - o Hylsyteipin taustapaperi
- Kartonkisalın ja kartonkikoneen puhtaanapitoon liittyvät apuvälineet
 - o ”Kottikeppi”, varsi PVC-muovia ja pääty halkaistua vesiletkua
 - o ”Mällinpurkukeppi”, varren suojana muovikalvo
 - o Harava
 - o Ulkoharja
- Muut muovilähteet
 - o Turvakenkien pohjallisten kulumat
 - o Öljynimeytysmatto

Edellä mainituista muovi- ja kumipohjaisista tuotteista otettiin pistonäytteet, jotka sulatettiin keitto-olosuhteita simuloivissa lämpötilaolosuhteissa. Pistonäytteet pilkottiin ensin pienemmiksi paloiksi, jonka jälkeen ne altistettiin uuniin 200 °C lämpötilalle 30 minuutin ajan. Uunin lämpötilaa kasvatettiin huoneenlämmöstä, 20 °C, tavoitelämpötilaan saakka, minkä jälkeen käynnistettiin ajastin. Näin varmistettiin, että näytteet saavuttivat kriittisen prosessilämpötilan, jossa itse massan keittäminen tapahtuu. Uunin lämpötilaa seurattiin digitaalisen lämpömittarin avulla, jolloin kyettiin myös seuraamaan kappaleiden sulamislämpötiloja, jos ne sulivat ennen kuin tavoitelämpötilan saavutettiin.

12.4 Tulokset

12.4.1 Sulatuskoeajot

Sulatuskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 8. Lisäksi liitteessä 1 on esitettynä kuva-pareja sulatuskoeajoista, joissa näytteistä on otettu kuvia ennen ja jälkeen käsittelyn.

Taulukko 8. Sulamiskoeajojen tulokset.

Muovilähde	Suli	Sulamislämpötila	Sulamisajankohta
<i>Kuivatusosan varusteita</i>			
Kuivatusviiran pala	x	150 - 175 °C (**	5 - 10 min
Kuivatusviiran lankoja	x	150 - 175 °C (**	0 - 5 min
Päänvientinaru	x		0 - 5 min
<i>Henkilökohtaiset suojaimet</i>			
Suojalasit	x	175 - 200 °C	
Kertakäyttöiset korvatulpat	x		0 - 5 min
Viiltosuojakäsineet	x	150 - 175 °C	
<i>Työntekovälineet</i>			
Lusan pala	x	150 - 175 °C	
Keränvaihtonaru	-	150 - 175 °C (**	10 - 15 min (***)
Hylsyteipin taustapaperi	-	175 - 200 °C (***)	
<i>Siistimiseen liittyvät apuvälineet</i>			
Kottikepin varsi	x	175 - 200 °C	
Kottikepin pää	-		
Mällinpurkukepin suojakalvo	-		
Harava	x		10 - 15 min
Ulkoharja	x	125 - 150 °C	
Öljynimeytysmaton pala	x	75 - 100 °C	

*) x = näytepala sulii; sulamislämpötila, jos näytekappale sulii ennen tavoitelämpötilaa; sulamisajankohta, kuinka monta minuuttia kesti ennen kuin näytekappale sulii tavoitelämpötilassa

**) näyte kاپertyi kyseisessä lämpötilassa / ajankohdassa

***) näyte tummeni kyseisessä lämpötilassa / ajankohdassa

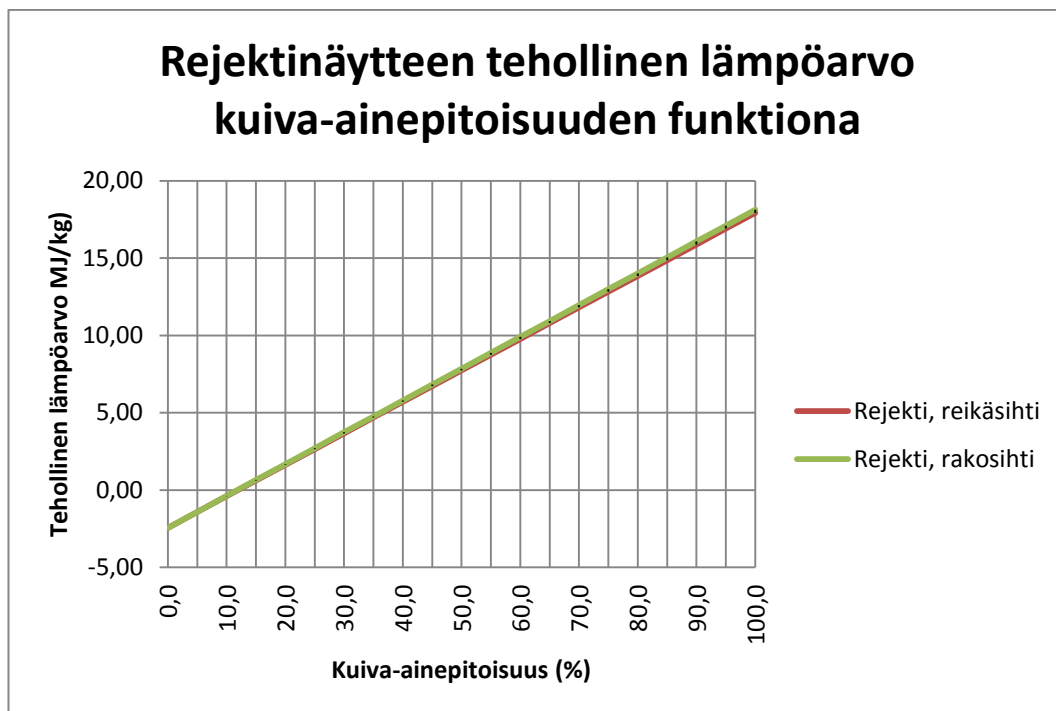
Edellä mainituista tuloksista nähdään, että rejektin sisältämät muovipartikkelit sulivat simuloituissa keittoprosessiolosuhteissa. Kumia sisältävät koepalat kestivät keittolosuhteita huomattavasti paremmin, mikä selittyy luonnonkumin suhteellisesti korkeammalla sulamispisteellä. Sulaneet muovinpalat tulevat näin ollen aiheuttamaan ongelmia keittoprosessissa mahdollisesti rikkoen prosessilaitteita. Edellä mainituista syistä johtuen voidaan todeta, ettei Heinolan kartonkikoneen rejekti sovellu kierrätettäväksi keittoprosessissa.

12.4.2 Rejektin lämpöarvo

Rejektin lämpöarvoa varten prosessista otettiin kaksi näytettä, yksi kummastakin kolmannen portaan lajittimen sihtikoeajosta. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon lämpöä voidaan saavuttaa poistamalla rejekti kokonaan Heinolan prosessista ja verrata kyseistä lämpöarvoa tehtaan voimalaitoksen metsähakkeen tuottamaan lämpöarvoon. Metsähake valikoitiin vastaavaksi polttoaineeksi verotus- ja savukaasuteknillisistä syistä.

Liitteessä 2 on esitettyä ulkopuolisen toimittajan selvitys rejektinäytteiden lämpöarvoista. Selvityksen perusteella kuivanäytteiden kalorimetriset lämpöarvot ovat 19,27 MJ/kg käytettäessä reikäsihtikoria sekä 19,46 MJ/kg käytettäessä rakosihtikoria. Näytteet oli suodatettu ja kuivattu ennen mittauksen suoritusta. Tehollisten lämpöarvojen ero on ainoastaan 0,19 MJ/kg, jonka perusteella voidaan todeta, että rejektivirrat sisälsivät suurimaksi osaksi vastaavanlaisia partikkeleita molemmissa koeajoissa. Myös näytteistä määrätetyt hiili-, vety- ja typpipitoisuudet vastaavat toisiaan.

Varsinainen tehollinen lämpöarvo perustuu vesihöyryn haihduttamiseen kuluvan energian poislaskemiseen saavutetusta kalorimetriarvosta, jonka johdosta todellinen tehollinen arvo on huomattavasti alempi kuin itse kalorimetrimäärittelyn aikana saavutettu tulos. Kuvassa 29 on kuvattuna näytteiden tehollinen lämpöarvo kuiva-ainepitoisuuden funktiona.



Kuva 29. Rejektinäytteen tehollinen lämpöarvo kuiva-ainepitoisuuden funktiona.

Riippuen vuodenajasta Heinolan Flutingtehtaan jätevesilaitoksen primääriliete pystytään saostamaan 20 – 35 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Käytettäessä 25 %:n kuiva-ainepitoisuutta rejektinäytteiden teholliset lämpöarvot laskevat arvoihin 2,65 MJ/kg (reikäsihtikori) ja 2,70 MJ/kg (rakosihtikori), jolloin ero sihtikorimallien välillä on vain 0,05 MJ/kg. 12 %:n kuiva-ainepitoisuudessa tehollinen lämpöarvo on molemmille näytteille 0,00 MJ/kg, eli näytteen veden höyryttämiseen kuluu yhtä paljon energiaa kuin sen polttamisesta voidaan saavuttaa.

Heinolan metsähakkeen lämpöarvo on vuoden 2013 tehtyjen määritysten perusteella ollut keskimäärin 10,94 MJ/kg, joka on huomattavasti korkeampi kuin rejektinäytteiden lämpöarvo. Silti edellä suoritettun lämpöarvomäärittelyn perusteella on rejekti höyryvoimalaitokselle soveltuva polttoaine, sillä sen lämpöarvo on positiivinen normaaleissa olosuhteissa. Mikäli primäärilietteen kuiva-ainepitoisuus laskee alle 12 %:n, on rejektin polttamisesta saatava lämpöarvo negatiivinen, jolloin se ei sovellu polttoprosessiin. Edellä mainittujen asioiden perusteella voidaan päätellä rejektin korvaavan murto-osan vuotuisesta metsähakkeen käytöstä lämmön- ja höyryntuotannossa, mikä tulee laskea kustannushyödyksi mahdollisessa investointilaskennassa.

13 LAJITINKOEAJOT

Koeajojen valmisteluvaiheessa toteutettiin esikokeet yhteistyössä Stora Enson tutkimuskeskuksen kanssa. Esikokeiden tarkoituksena oli tutkia lajitinlaitteiston sekä massalaboratorion määritysten tekemistä. Lisäksi esikokeista saatujen alustavien tulosten perusteella pystyttiin valitsemaan soveltuvimmat lajitinominaisuudet tehdaskoeajoja varten.

13.1 Esikokeet

Esikokeiden tavoitteena oli saada alustavanlaatuinen havainto sihtipinnan muuttamisen vaikutuksesta puhtaustulokseen. Esikokeet suoritettiin Stora Enson tutkintakeskuksen tiloissa, käyttäen Valmetin laboratoriolajitinta sekä massalaboratoriossa sijaitsevia määrittäslaitteita. Esikokeissa pyrittiin selvittämään, minkä tyyppinen sihtirumpu soveltuisi Heinolan massan lajitteluun.

13.1.1 Lajitinsoveltuvuus

Lajitinsoveltuvuutta tutkittiin lajittelemalla rejektisihdiltä saatua massaa atmosfääriseen lajittimen avulla tutkimuskeskuksen tiloissa. Menetelmä perustui näköhavaintoihin. Lajittimen lävitse ohjattiin n. kaksi litraa massaa, jonka jälkeen rejektipuoli tyhjennettiin. Aksepti otettiin talteen ja jakeista verrattiin roskapitoisuuksia silmämääräisesti. Lajitinsoveltuvuudella pyrittiin havainnollistamaan millaisella sihtiraolla kartonkikoneen massaa voitaisiin seuloa ilman tukkeutumislilmion tai kuitutappioiden muodostumista. Jokaisen koepisteen lajitinsoveltuvuus määritettiin kahdella rinnakkaismäärityksellä.

13.1.2 Tulokset

Lajitinsoveltuvuuskokeiden tulokset on esitettyinä taulukossa 9. Taulukosta ilmenee, että pienin mahdollinen lajitteluun soveltuva rakosihtikorin aukkoaleveys on 0,25 mm. Käytettäessä kyseistä leveyttä rakosihdillä atmosfäärilajitin pystyi lajittelemaan Heinolan massoja kuituhäviöittä sekä tukkeutumatta. Esikoeajoissa käytettyjen massojen perusominaisuuksia on taulukoituna liitteessä 3.

Taulukko 9. Esikoeajotulokset.

Rakoleveys	Syöttö	Rejekti	Kommentti
0,30 mm	OK	OK	
0,25 mm	OK	OK	
0,20 mm	-	OK	Syöttömassan osalta kertyy kuituja rejektiin
0,15 mm		OK	
0,10 mm		-	Rejektimassan osalta kertyy kuituja rejektiin

Atmosfäärisen lajittimen hyödyntäminen esikoelaitteena ei kuitenkaan anna todellista kuvaa painelajittelusta. Painerajittimessa leikkausvoimat korostuvat, niitä ilmenee paljon enemmän painerajittimessa kuin atmosfäärissä lajittimessa. Tästä johtuen esikokeissa ilmenneitä tuloksia ei voida mallintaa tehdasmittakaavaisen painerajittimen toiminnassa. Sen sijaan esikokeet antoivat selkeän kuvan, kuinka lajittelun tulisi toimia ja millä eri tavoilla lajittelua voisi säätää, mistä oli hyötyä varsinaisten tehdasmittakaavaisten koeajojen suorittamisessa.

13.2 Tehdasmittakaavaiset kokeet

Tehdasmittakaavaisissa koeajoissa tarkasteltiin sekä nykyisen yhdistelmän, kolmannen portaan lajitteluvaiheen että uusien konesihtirumpujen toimintaa. Tarkasteltavia koepisteitä olivat rejektisihdin nykyinen tilanne, konesihtien nykyinen tilanne sekä vanhoilla että uusilla sihtirummuilla ja viimeisenä koeajona kolmas lajitteluvaihe, johon oli valittavissa joko reikä- tai rakomallinen sihtikori. Pääkoepisteet ovat taulukoituna taulukossa 10.

Taulukko 10. Tehdasmittakaavaisten lajitinkoeajojen pääkoepisteet.

Pääkoepiste	Konesihtti 3 (1. vaihe)	Konesihtti 4 (1. vaihe)	Rejektisihti (2. vaihe)	Koelajitin (3. vaihe)
1	Reikäsihti	Reikäsihti	Reikäsihti	-
2	Rakosihti (*)	Rakosihti (*)	Reikäsihti	-
3	Reikäsihti	Reikäsihti	Reikäsihti	1,60 mm reikä
4	Reikäsihti	Reikäsihti	Reikäsihti	0,25 mm rako

*) konelajittimien rejektivirtaukset oli muutettava tukkeutumisongelmien välttämiseksi

Rejektisihdin nykyinen toimintakyky haluttiin selvittää, jotta tiedettäisiin tarvitaanko Heinolaan mahdollisesti kolmatta lajitinporrasta ylläpitämään hyvää erottelutehokkuutta läpi lajittelukierron. Rejektisihdin toimintaa pyrittiin selvittämään rejektisuhdetta muuttamalla, jotta nähtäisiin pysyykö sihti ajossa myös alhaisilla rejektivirtauksilla ja korkeammassa sakeudessa.

Kuten jo kirjallisuudessa tuli selväksi, ovat kiilalankasihdit suhteellisesti parempia erottelemaan pienikokoisia epäpuhtauksia kuin reikä- ja rakosihdit. Tämän perusteella koeajoja varten hankittiin Heinolaan konesihteihin profiloitunut kiilalankasihti, minkä lisäksi koelajittimeen hankittiin sekä reikämallinen että rakomallinen sihtikori. Hypoteesinä oli, että uusien, tiukempien sihtirumpujen avulla päästäisiin parempiin erottelutehok-

kuuksiin kuin aikaisemmilla reikäsihdeillä. Samalla oletettiin rejektimäärän kasvavan, mikä loisi lisätarpeen kolmannelle lajitteluvaiheelle.

Kolmannen lajitteluvaiheen lajittimeksi valittiin Valmetin ProFS-25LC, joka oli 1,60 mm rei'illä ja siivekeroottorilla varustettu painelajitin. Koepainelajitin kytkettiin suoraan rejektisihdin rejektivirtaukseen, jolloin erillistä pumppausvaihetta ei vaadittu. Sen sijaan rejektin eteenpäin pumppaamista varten oli hankittava erillinen säiliö ja pumppu, jotta rejekti olisi saatu lopulliseen määränpäähän. Koepainelajitinta ei laimennettu käynnin aikana, vaan sitä pyrittiin hallitsemaan vallitsevin sakeusolosuhtein.

Tehdasmittakaavaisten koeajojen päätavoitteena oli löytää optimaalinen prosessiratkaisu rejektinhallintaa varten, minkä takia tässä työssä ei keskitytty etsimään optimaalisia prosessiparametreja lajittelua varten.

13.3 Koeajosuunnitelma

13.3.1 Rejektisihti

Nykyisen rejektisihdin toimintaa tarkasteltiin rejektisuhdetta muuttamalla. Automaatiojärjestelmä mahdollisti rejektisuhteen vaivattoman muutoksen prosessinohjauksella, johon pystyi vaikuttamaan suhdesäätöarvoa valitsemalla. Suhdesäätöarvo oli valittavissa 5 – 15 %:n alueelta. Koeajoja varten sihtiä käytettiin vuorokauden ajan rejektisuhdesäädön molemmissa ääripäissä, 5 % ja 15 %. Näytteet otettiin vuorokauden koeajojakson päätteeksi, jonka uskottiin olevan riittävän pitkä aikaväli erojen esilletuloa varten.

13.3.2 Konesihdit

Konesihtien toimintaa pystyttiin seuraamaan ainoastaan rejektivirtaa muuttamalla, koska syöttö- ja akseptivirtaukselle ei ollut näytteenottopistettä, josta olisi saanut selkeän kuvan lajittimien toiminnasta. Lisäksi, kartonkikoneen perälaatikolle syöttävä virtaus seurasi kartonkikoneen nopeutta, joka muuttui tuotantonopeuden ja -lajin mukaisesti.

Konesihtien toimintaa vanhoilla sihtikoreilla kokeiltiin ennen huoltoseisokkia, minkä aikana uudet kiilalankasihdit asennettiin koneeseen. Muutoksesta johtuen normaalin ajotilanteen vallitessa joudutaan konesihtien rejektivirtauksia kasvattamaan, koska sihdit ovat tiukempia seulomaan epäpuhtauksia edeltävään sihtimallin verrattuna, mikä johtaisi epäpuhtauksien kertymiseen sihtipinnalle. Molempien konesihtien rejektivirtauksia kasvatettiin uusien sihtien asennuksen jälkeen noin 25 – 30 %, minkä uskottiin olevan sopiva taso sihtien normaalille toiminnalle.

Varsinaisissa koeajoissa konesihtien rejektivirtauksien ääripäinä pystyttiin kuitenkin hyödyntämään samoja rejektivirtauksia kuin reikäsihtikoeajoissa, jotka olivat 15 l/s ja 35 l/s molemmille sihdeille. Lisäksi koeajojen aikana seurattiin kartonkikoneen kulkua ja mahdollisia katkosyitä, jos katkoja ilmeni koeajojen aikana.

13.3.3 Kolmas lajitteluvaihe

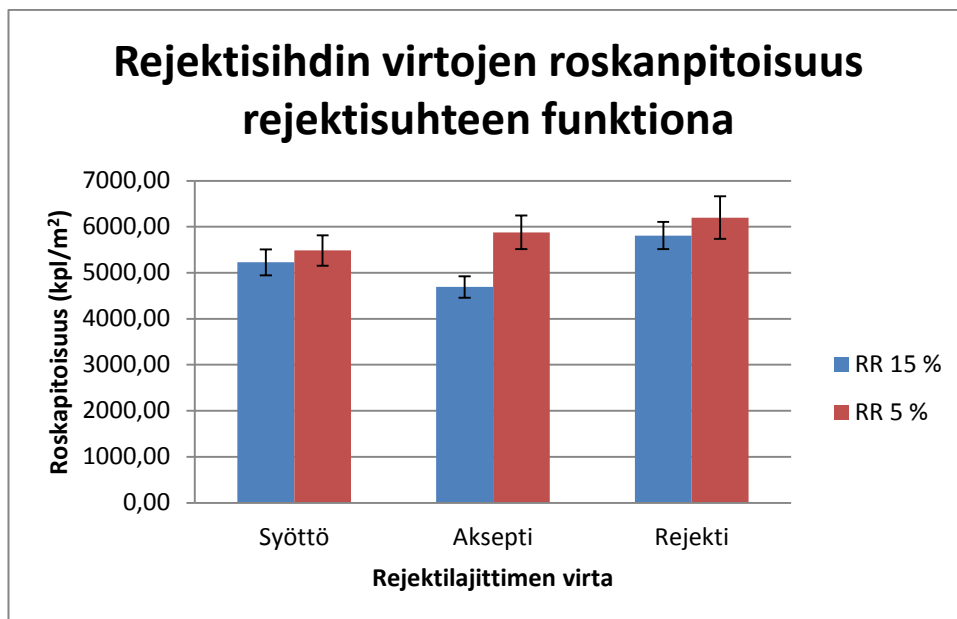
Kolmannen portaan lajitteluvaiheen koeajoissa oli tarkoituksena selvittää, kuinka pieneen rejektivirtaukseen oli mahdollista päästä riittävän hyvällä erottelutehokkuudella. Tavoitteena oli saada mahdollisimman paljon epäpuhtauksia rejektivirtaukseen ilman, että sen suurempia kuituhäviöitä syntyisi. Koepainelajittimen rejekti ohjattiin sellutehtaan kaarisihdille, missä tavoitteena oli kerätä kuidut ja epäpuhtaudet jätevesilaitoksen primääri-lietteeseen johtavaan säiliöön. Koepainelajittimen aksepti ohjattiin takaisin lajitinkierrossa olevaan rejektisäiliöön. Näin koeajotilanteesta muodostui kaskaditoiminen koeajojärjestelmä.

Koeajojen aikana pyrittiin seuraamaan koepainelajittimen toimintaa erottelutehokkuuden, sakeuden sekä eteenpäin pumppaamisen osalta. Lisäksi kaarisihdin toimintaa seurattiin, jottei se menisi tukkoon liiallisen kuidun syötöstä. Rejektivirtaustasoksi valittiin 1,0 l/s, joka kuvasi 10 %:n rejektisuhdetta koepainelajittimelle. Kolmannen portaan koepainelajittinta pyrittiin pitämään ajossa vähintään kolme päivää ennen varsinaista näytteenottoa, jotta nähtäisiin selkeitä muutoksia lajittimen aksepti- ja rejektivirrassa.

13.4 Tulokset

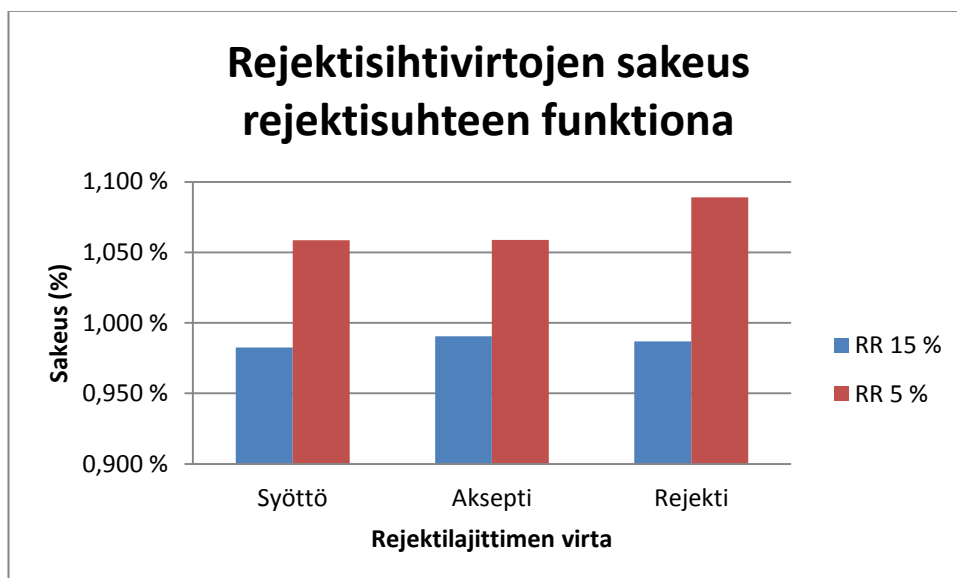
13.4.1 Rejektisihti

Kuvassa 30 on esitettyinä rejektisihdin virtojen roskapitoisuudet rejektisuhteen funktiona 95 % luottamusvälein. Kuvasta voidaan päätellä, että rejektisuhteen muutos pienempään heikentää erottelutehokkuutta, mikä poikkeaa osittain kirjallisuudessa esitetystä teoriasta. Oletus johtuu lisääntyneestä roskapitoisuudesta sekä aksepti- että rejektivirtauksessa. Jotta muutos olisi vaikutukseltaan positiivinen, tulisi roskapitoisuus akseptivirtauksessa pienetä ja rejektivirtauksessa kasvaa. Syyksi oletetaan hankaloituneet olosuhteet sihdin normaalille toiminnalle. Hankaloituneet olosuhteet pystyttiin myös todentamaan selkeänä kasvuna sihdin syötön ja akseptin välisessä paine-erossa, mikä indikoi sihdin osittaista tukkeutumista alhaisemmassa rejektisuhteessa.



Kuva 30. Rejektisihdin virtojen roskapitoisuus rejektisuhteen funktiona.

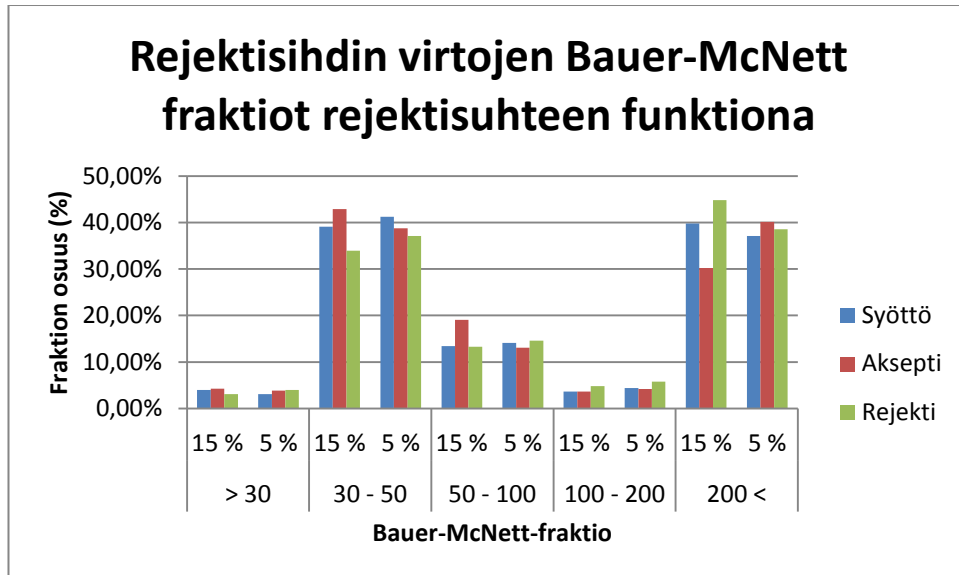
Kuvassa 31 on havainnollistettu rejektisihdin virtojen sakeudet rejektisuhteen funktiona. Kuvasta voidaan päätellä, että rejektisuhteen muutos pienempään kasvattaa lajiteltavan massan sakeutta, mikä tukee kirjallisuudessa esitettyä teoriaa.



Kuva 31. Rejektisihdin virtojen sakeus rejektisuhteen funktiona.

Kuvassa 32 nähdään rejektisihdin virtojen Bauer-McNett fraktiot rejektisuhteen funktiona. Bauer-McNett fraktioista ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä, sillä rejektisuhteen muutos ei vaikuttanut kuitujakaumaan juuri lainkaan. Akseptivirtauksessa on nähtävissä pieni ero eri rejektisuhteille, mutta kyseiset erot liittyvät joko hienoaineksen fraktioon,

200 <, tai keskipitkien kuitujen fraktioihin, 30 – 50 ja 50 – 100. Heinolan kartonkikoneella ongelmallisin fraktio on > 30. Fraktioerot ovat silti teorianmukaisia, sillä reikäpintainen sihtikori on kehitetty fraktiointilajitteluun, jolloin rejektisuhteen muutos ei tule vaikuttamaan fraktiointitulokseen, vaan sihtikorin reikien koko.



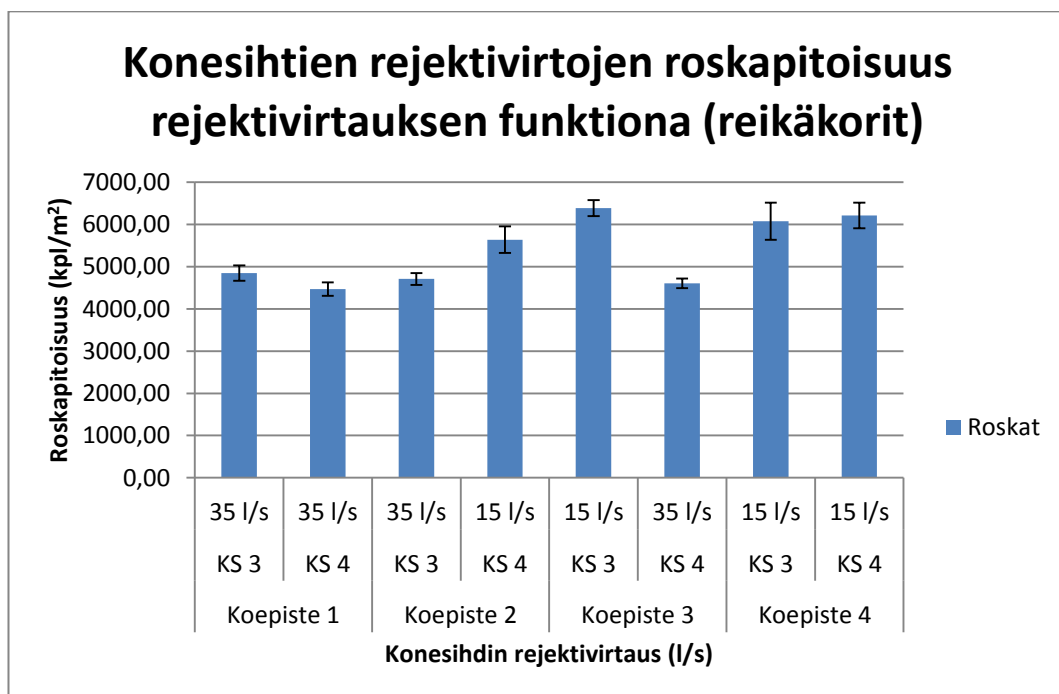
Kuva 32. Rejektisihdin virtojen Bauer-McNett fraktiot rejektisuhteen funktiona.

Liitteessä 4 on taulukoituna muita rejektisihdin koeajotuloksia. Massaominaisuuksien taulukoiduista arvoista voidaan päätellä massojen olleen lähestulkoon samanlaisia, mikä tukee edellä esitettyjen kuvaajien tuloksia. Yksisuuntaisista varianssianalyyseistä voidaan todeta, että rejektisuhteen muutoksella on tilastollisesti merkittävä vaikutus akseptivirtauksen roskapitoisuuteen käytettäessä 5,0 % merkitsevyystasoa. Muiden virtauksien osalta muutos rejektisuhteessa ei aiheuta tilastollisesti merkittäviä muutoksia virtojen roskapitoisuuteen. Edellä mainittu eroa merkittävästi lajitteluteoriasta, minkä mukaan normaali-toimisessa lajitteluprosessissa sekä aksepti- että rejektivirrassa tulisi näkyä tilastollisesti merkittävä muutos.

Rejektisihdikoeajojen selkein anti oli, että rejektisihdin rejektisuhteen pienentäminen ei vaikuta oleellisesti sihdin erottelutehokkuuteen. Sen sijaan rejektisuhteen pienentäminen hankaloittaa sihdin toimintaa. Yksisuuntainen varianssianalyysi tukee edellä mainittua johtopäätöstä ja näin ollen rejektisihti tulisi operoida nykyisellä 15 % rejektisuhteella ja hyödyntää kolmannen portaalan lajitinta kuituhäviöiden vähentämiseksi, mikäli rejekti tulevaisuudessa olisi tarkoitus poistaa massakierrosta kokonaan.

13.4.2 Konesihtit

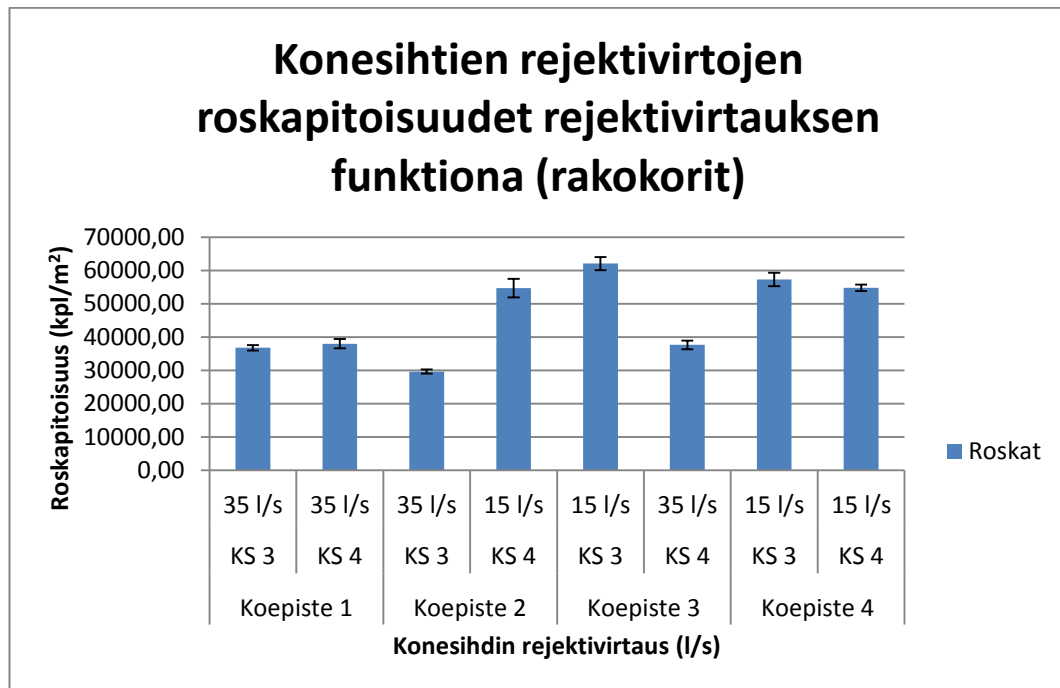
Kuvassa 33 on esitettynä konesihtien rejektivirtojen roskapitoisuudet rejektivirtauksen funktiona 95 % luottamusvälein käytettäessä reikämallisia sihtikoreja. Kuvasta voidaan päätellä, että rejektivirtauksen pienentäminen lisää rejektivirtauksen roskapitoisuutta huomattavasti. Kaikkein roskapitoisin rejektijae saadaan aikaan, kun käytetään molempia konesihtejä alemmalla rejektivirtauksella. Roskapitoisuustulokset ovat lajitteluteorian mukaisia, sillä rejektivirtauksen pienentäminen pienentää samalla sihdin rejektisuhdetta, jonka pienennys on tiedetty parantavan erottelutehokkuutta. Toisin sanoen, lajiteltavaa massaa ei poisteta yhtä paljon rejektin puolelle, jolloin lajiteltava massa altistetaan pidempiaikaiselle puhdistukselle kuin muutoin. Valitettavasti akseptivirran seuraaminen ei ollut teknisesti mahdollista, jolloin olisi voitu vertailla akseptoitavan massan puhtautta.



Kuva 33. Konesihtien rejektivirtojen roskapitoisuus rejektivirtauksen funktiona (1,60 mm reikäkorit).

Kuvassa 34 on esitettynä konesihtien rejektivirtojen roskapitoisuudet rejektivirtauksen funktiona 95 % luottamusvälein käytettäessä rakomallisia sihtikoreja. Kuten edellisessä kuvassa, myös tässä kuvassa nähdään selkeä roskapitoisuuden kasvu pienennettäessä rejektivirtausta lajitTIMEN lävitse. Merkittävintä on kuitenkin sihtikorimallien väliset roskapitoisuudet, missä rakosihtit kykenevät lajittelemaan rejektii huomattavasti tarkemmin kuin reikäsihtit. Sihtien välinen roskapitoisuusero on noin kymmenkertainen jokaisen koepisteen osalta. Kyseinen tulos on erittäin merkittävä ja havainnollistaa erittäin hyvin

kuinka paljon reikäsihtiä tehokkaampi rakosihti on lajittelemaan epäpuhtauksia, joiden dimensiot ovat vaihtelevia.



Kuva 34. Konesihtien rejektivirtojen roskapitoisuudet rejektivirtauksen funktiona (0,25 mm rakokorit).

Edellä mainittujen sihtikorimallien eroavaisuudet erottelutehokkuudessa on myös havainnollistettu kuvassa 35 ja kuvassa 36, jossa on molempien konesihtien, KS 3:n ja KS 4:n, rejektivirrasta valmistetut käsiarkit käytettäessä molempia sihtikoriyyppejä.



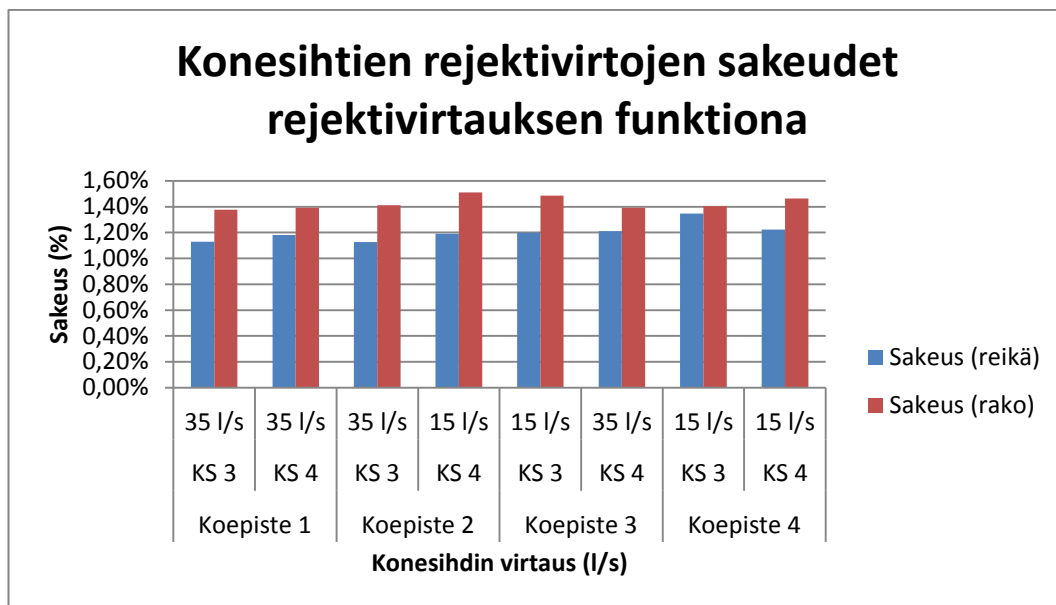
Kuva 35. KS 3:n rejektistä valmistetut käsiarkit; vasemmalla rakosihti ja oikealla reikäsihti.



Kuva 36. KS 4:n rejektistä valmistetut käsiarkit; vasemmalla rakosihti ja oikealla reikäsihti.

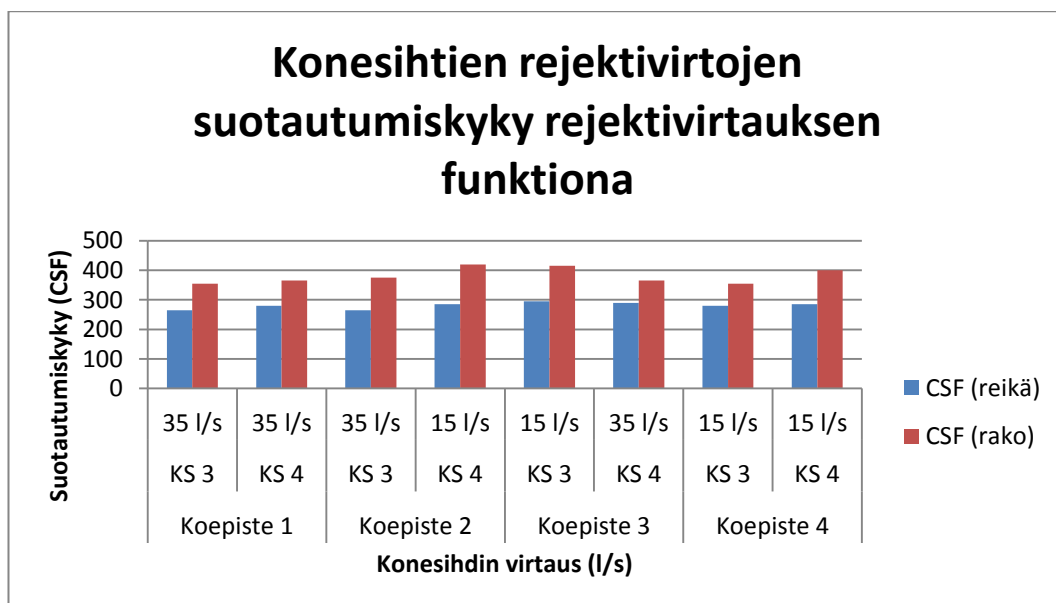
Liitteessä 5 on esitetty konesihtikoeajojen kaksisuuntaiset varianssianalyysit molemmille konesihteille, jossa on käytetty muuttujina rejektivirtauksen määrää ja sihtirummun mallia. Varianssianalyysien perusteella voidaan todeta, että konesihtien sihtikorin valinnalla ja rejektivirtauksen määrällä on merkittävät vaikutukset rejektivirran roskapitoisuuteen käytettäessä 5,0 % merkitsevyystasoa. Lisäksi edellä mainittujen muuttujien, sihtikorin valinnan ja rejektivirtausmäärän, yhteisvaikutus on merkittävä. Edellä mainittujen tulosten valossa voidaan päätellä, että sihtikorimallin vaihtaminen rakokoriin ja pienemmän rejektivirtauksen ylläpitäminen antaa paremman puhdistustuloksen. Pienemmän rejektivirtauksen ylläpitäminen aiheuttaa kuitenkin vaaratekijän, sillä sihdit voivat mennä tukkoon. Lisäksi tuloksista ilmenee, että suurin vaikutus saadaan aikaan vaihtamalla sihtikorimallia, jolloin konesihtien kannalta kannattaa keskittyä sihtikorimallin optimointiin ennen kuin muutetaan rejektivirtauksia, josta voi ilmetä muunlaisia ongelmia kartonkikoneen massansyöttöön liittyen.

Kuva 37 esittää konesihtien rejektivirtojen sakeudet rejektivirtauksen funktiona. Tarkasteltaessa kuvaajaa nähdään, ettei rejektivirtausmäärän muuttaminen aiheuta merkittävää muutosta rejektivirtauksen sakeudessa. Sen sijaan sihtikorien välillä on eroavaisuutta, missä rakosihdit sakeuttavat rejektiä huomattavasti enemmän kuin reikäsihdit. Havainnot edustavat kirjallisuudessa läpikäytyä teoriaa, missä rakosihdit todettiin sakeuttavan rejektiä huomattavasti enemmän kuin reikäsihdit.



Kuva 37. Konesihtien rejektivirtojen sakeudet rejektivirtauksen funktiona.

Kuvassa 38 on esitetty konesihtien rejektivirtojen suotautumiskyky rejektivirtauksen funktiona. Rejektivirtauksen muuttaminen kummallekaan sihdille molemmilla sihtikori-vaihtoehdolla ei vaikuttanut merkittävästi. Sen sijaan kuvasta nähdään selkeä ero suotautumiskyvyssä sihtikorivaihtoehtojen välillä. Rakokori on selkeästi parempi lajittelemaan karkeita partikkeleita rejektiin kuin reikäsihti. Matala suotautumiskyky havainnollistaa lyhyiden kuitujen ja hienoaineksen läsnäoloa, jolloin suotautumiskyvyn kasvu rakokori-tapauksissa merkitsee lyhyiden kuitujen ja hienoaineksen läsnäolon puuttumista.



Kuva 38. Konesihtien rejektivirtojen suotautumiskyky rejektivirtauksen funktiona.

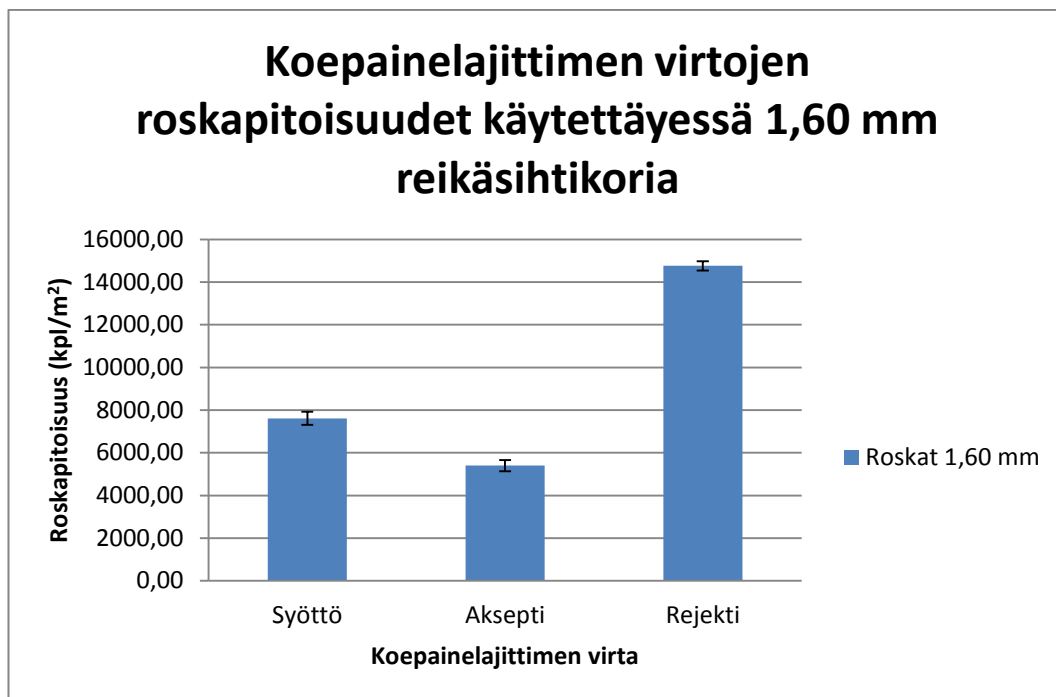
Muut konesihtikoeajojen tulokset ovat taulukoituina liitteessä 5. Liitteen tuloksista voidaan tehdä samankaltaisia johtopäätöksiä kuten edellä; rakosihtit lajittelevat karkeat ja epänormaalit partikkelit tarkemmin.

Laboratoriomääritysten jälkeen konesihtien rejektivirtaukset palautettiin normaaleihin ajo-olosuhteisiin, rejektivirtauksen ollessa noin 40 l/s molemmille konesihtideille. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka rakosihtit vaikuttavat lopputuotteen laatuun ja ajettavuuteen pitkällä aikavälillä. Valitettavasti kyseinen koeajotilanne päättyi vajaan vuorokauden kuluessa molempien konesihtien mennessä äkillisesti tukkoon, mikä pystyttiin myös havaitsemaan äkillisenä muutoksena molempien sihtien syöttö- ja akseptivirtauksen välisessä paine-erossa. Tukoksen epäiltiin aiheutuvan joko heikosta turbulentsisuudesta sihtikorien pinnalla, liian pienestä rakoleveydestä, massan epäsäännöllisestä kuitujakaumasta, liian hitaasta roottorinopeudesta, liian alhaisesta rejektivirtauksesta tai liian epäpuhtaasta massasta.

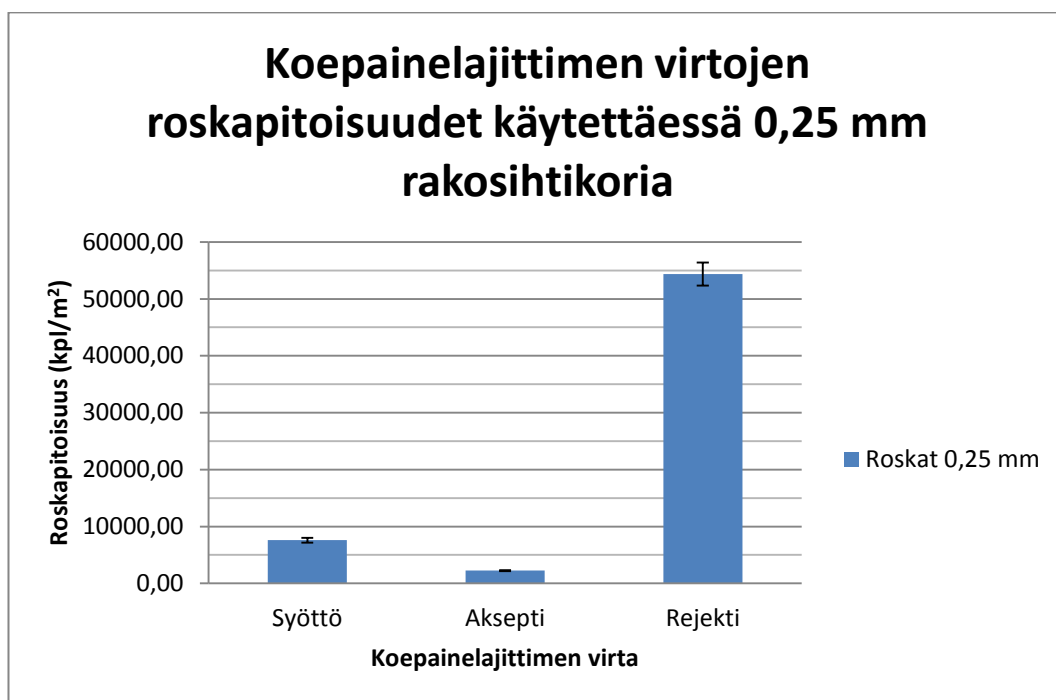
Edellä mainitut epäilykset perustuivat lajittelun perusteoriaan, jossa lajittelu on riippuvainen laitekohtaisista, prosessin ajoparametrien sekä lajiteltavan massan ominaisuuksista. Koska molemmat sihtit menivät samanaikaisesti tukkoon, kohdistuivat pääepäilykset lajiteltavan massan ja lajittimen väliseen toimintaan, jolloin pääepäilyksi valikoitui sihtikorien rakoleveys. Ennaltaehkäisevänä ratkaisuna sihtikorit lähetettiin takaisin valmistajalle sihtikorien rakojen laajennusta varten, minkä jälkeen konesihtejä on tarkoitus kokeilla uudemman kerran.

13.4.3 Kolmas lajitteluvaihe

Kuvassa 39 ja kuvassa 40 on esitetty koepainelajittimen virtojen roskapitoisuudet käytettäessä 1,60 mm reikäsihtikoria ja 0,25 mm rakosihtikoria. Kuvista nähdään selkeä ero lajitinkorien erottelutehokkuudessa, rakokorin ollessa noin viisi kertaa tarkempi erottelemaan epäpuhtaita partikkeleita rejehtiin. Vaikutus on myös havaittavissa akseptijakeen roskapitoisuuksista, jossa rakosihtikorin akseptivirtauksessa on kolmannes epäpuhtaista partikkeleista reikäsihtikorin akseptivirtaukseen nähden. Samanlainen ilmiö toistui aikaisemmin konesihtien osalta, mikä havainnollistaa erittäin hyvin lajitteluteorian oikeaksi. Rakosihtikori on parempi vaihtoehto puhdistuslajittelua varten kuin reikäsihtikori. Valinnalla saadaan selkeästi puhtaampi akseptijae sekä likaisempi rejehtijae.

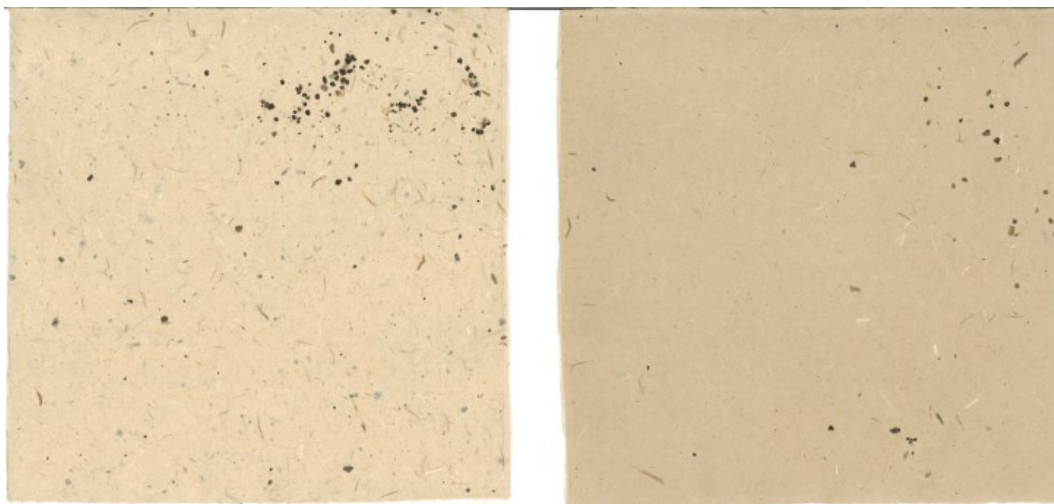


Kuva 39. Koepainelajittimen virtojen roskapitoisuudet käytettäessä 1,60 mm reikäsihttikoria.



Kuva 40. Koepainelajittimen virtojen roskapitoisuudet käytettäessä 0,25 mm rakosihttikoria.

Edellä mainittujen sihtikorimallien eroavaisuudet koepainelajittimen erottelutehokkuudessa on myös havainnollistettu kuvassa 41, jossa on rejektivirrasta valmistetut käsiarkit käytettäessä molempia sihtikorimalleja.

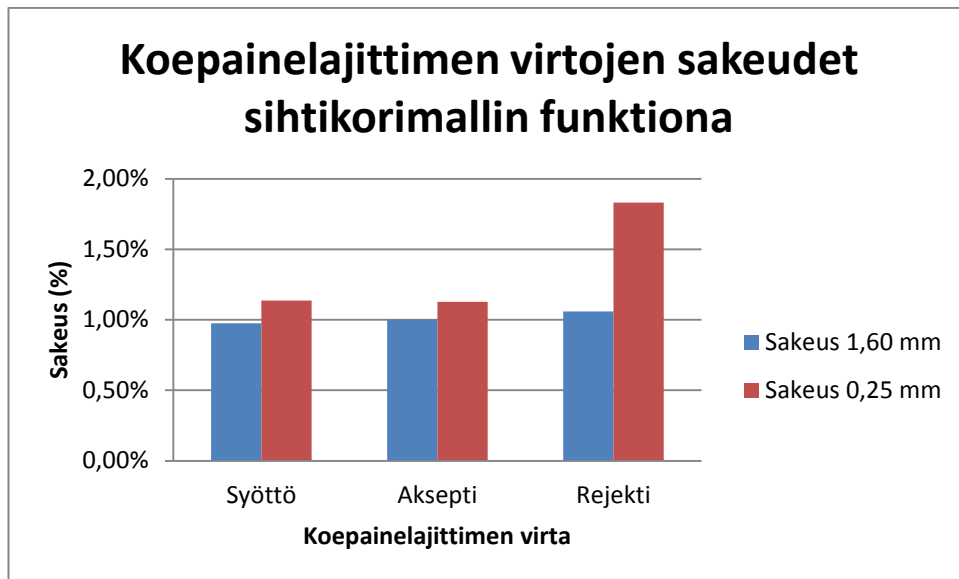


Kuva 41. Koepainelajittimen rejektivirrasta valmistetut käsiarkit; vasemmalla 0,25 mm rakosihti ja oikealla 1,60 mm reikäsihti.

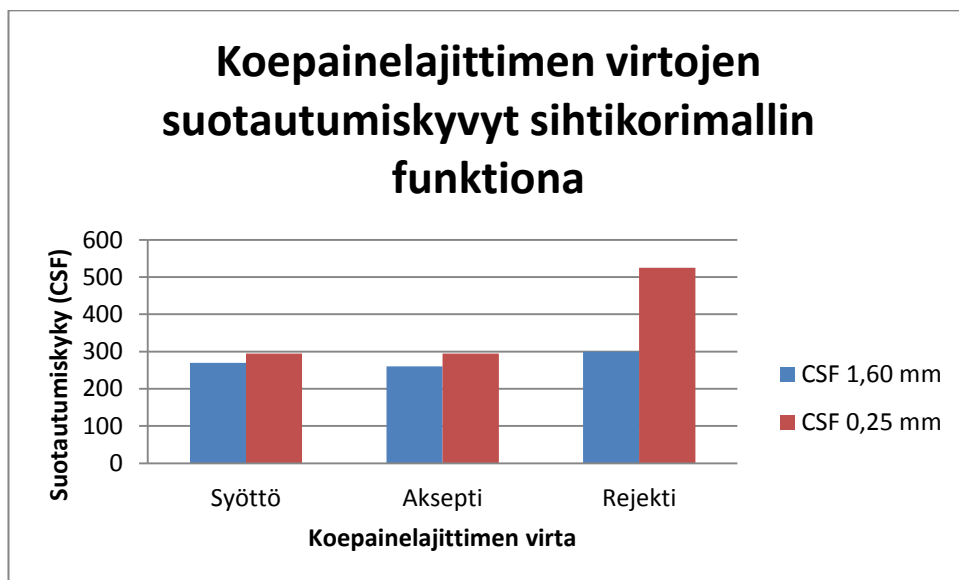
Koepainelajittimen kaikille virtauksille suoritettujen yksisuuntaisten varianssianalyysien tulokset ovat taulukoituina liitteessä 6. Varianssianalyysien tuloksista ilmenee, että sihtikorimallilla on erittäin merkittävä vaikutus aksepti- ja rejektivirtojen roskapitoisuuteen. Syöttövirtauksen roskapitoisuuteen sihtikorimallilla ei ole merkitystä, mikä on täysin ymmärrettävää, koska syöttövirtauksen massa ei ole lajiteltu. Tulos on silti merkityksellinen, koska tulos esittää, että molempien sihtikorimallien koeajojen aikana lajiteltava massa ei muuttunut merkittävästi, jolloin koeajojen tulokset ovat verrattavissa toisiinsa.

Varianssianalyysien perusteella voidaan todeta, että koepainelajittimen sihtikoriin valinnalla on merkittävä vaikutus aksepti- että rejektivirran roskapitoisuuteen käytettäessä 5,0 % merkitsevyystasoa. Edellä mainittujen tulosten valossa voidaan päätellä, että sihtikoriin vaihtaminen rakokoriin antaa paremman puhdistustuloksen.

Lisäksi kuvassa 42 ja kuvassa 43 esitetään koepainelajittimen virtojen sakeudet ja suotautumiskyvyt sihtikorimallin funktiona. Kuvista ilmenee varsin selkeästi, että rakosihtikori lajittelee paljon tehokkaammin rejektimassaa erilaisiin fraktioihin, sillä erot sakeuksissa ja suotautumiskyvyssä ovat suuremmat rakosihtikoria käytettäessä. Sekä sakeuden että suotautumiskyvyn kasvu tarkoittaa lyhyiden kuitujen ja hienoaineksen pienenemistä kyseisen virtauksen osalta, mikä on yhdistettävissä kirjallisuudessa esitettyihin lajitteluteorioihin koskien erottelutehokkuutta.

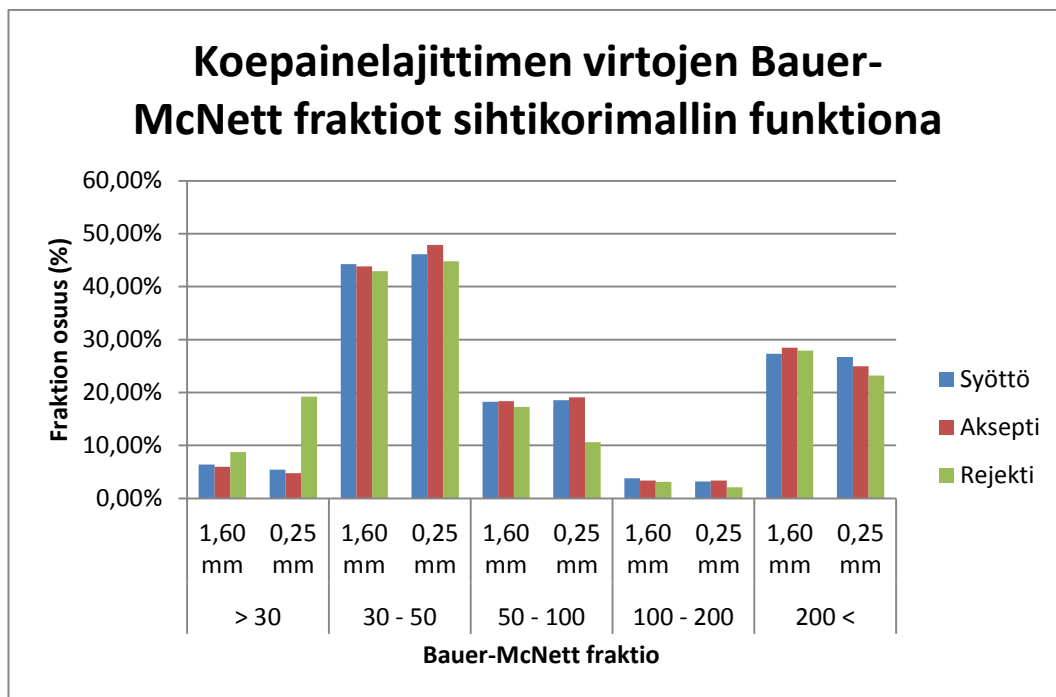


Kuva 42. Koepainelajittimen virtojen sakeudet sihtikorimallin funktiona.



Kuva 43. Koepainelajittimen virtojen suotautumiskyky sihtikorimallin funktiona.

Edellä mainitut tulokset ovat myös havaittavissa kuvassa 44, jossa esitetään koepainelajittimen virtojen Bauer-McNett fraktiot sihtikorimallin mukaan. Tarkasteltaessa fraktiota huomataan varsin selkeä ero > 30 fraktion osalta, missä 0,25 mm rakosihtikori kykenee erottelamaan rejektivirtaukseen enemmän suurikokoisempia roskia. Kyseisen fraktion roskat ovat isokokoisempia, jotka voivat hyvin todennäköisesti puhkoa paperirainan pinnan. Lisäksi kuvasta nähdään, että lajittimen syöttö- ja akseptivirtojen fraktiot ovat lähes tulkoon samanlaisia, mikä indikoi hyvää selektiivisyyttä lajittelun osalta.



Kuva 44. Koepainelajittimen virtojen Bauer-McNett fraktiot sihtikorimallin funktiona.

Liitteessä 6 on taulukoituina muita kolmannen lajitteluvaiheen koeajotuloksia. Edellä mainittujen kuvaajien, tulkintojen sekä varianssianalyysien perusteella voidaan päätellä, että rakosihtikorilla varustettu koepainelajitin soveltuu paremmin lajittelemaan Heinolan kartonkikoneen rejektimassaa. Koepainelajittimelta lähtevä aksepti on puhtaampi, joka soveltuu kartonginvalmistukseen erinomaisesti, minkä lisäksi rejektijae sisältää huomattavasti enemmän roskaa käytettäessä rakosihtikoria.

Lisäksi koeajojen aikana tarkastettiin myös tehtaan muiden toimintojen toimivuutta, jotka olivat kaarisihdin toiminta sekä jätevesilaitoksen primäärilieteyksien toiminta. Edellä mainitut osaprosessit toimivat koeajojen aikana täysin normaalisti, sekä reikä- että rakomallisella sihtikorilla, mistä voidaan päätellä, että kolmannen lajitteluvaiheen rejekti on mahdollista poistaa aallotuskartongin valmistusprosessista ilman suurempia seurauksia.

14 VAIHTOEHTOISET PROSESSIRATKAISUT

14.1 Hyötykäyttö massanvalmistuksessa

Heinolan nykyisessä lajittamokytkenässä hyödynnetään rejektin uudelleenkierrätystä. Rejektivirta ohjataan rejektisihdiltä massakiertoon, missä rejekti joutuu uudelleen jauhattavaksi. Uudelleenjauhatus lisää kuitujen ja tikkujen fibrillatiota sekä pienentää partikkeleiden kokoa. Epäpuhtaiden partikkeleiden pilkkoutuminen pienemmiksi partikkeleiksi mahdollistaa epäpuhtaiden partikkeleiden akseptoitumisen uudelleenlajittelussa. Näin ollen aikaisempi roska päättyy lopulta lopputuotteeseen, missä se aiheuttaa ongelmia lopputuotteen lujuuteen ja ajettavuuteen. Myös ylimääräisen hienoaineksen luonti on haitallista viiraosan vedenpoistoa ajatellen, jolloin tikkujen ja kuitujen uudelleenjauhamisesta on enemmän haittaa kuin hyötyä lopputuotteen ominaisuuksille.

Menetelmän selkein hyöty on kuituhäviöiden minimointi, mutta samalla rejektin sisältämä hiekka, kiviaines ja muut kovat partikkelit aiheuttavat laitteistojen kulumista. Heinolassa kyseinen ilmiö on havaittu jauhinterien nopeutuneena ikääntymisenä, missä jauhimien terät kuluvat huomattavasti nopeammin kuin terävalmistajan viitteellinen ennuste ikääntymiselle.

Huomioitaessa Heinolan nykyinen lajittelujärjestelmä ja -kapasiteetti sekä rejektisihtikoeajojen tulokset on rejektin poistaminen massakierrosta erittäin epätodennäköistä. Rejektisihdin rejektivirtauksen määrä on n. 10,0 l/s, mikä aiheuttaisi tuntuvat kuitutappiot sekä ongelmia tehtaan muissa toiminnoissa. Rejektin muodostumismäärä on aivan liian suuri hallittavaksi, mikä johtaisi esim. jätevesilaitoksen ylikuormittumisen.

14.2 Hyötykäyttö polttoaineena

Rejektin hyödyntäminen polttoaineena on sen lämpöarvosta riippuvainen. Rejektin poistaminen massakierrosta tapahtuisi sellutehtaan purulietteen mukana, jolloin rejektivirrasta pyrittäisiin erottamaan osa prosessivedestä takaisin nollavesikiertoon. Purulietettä käytetään Heinolassa yhdessä turpeen ja metsähakkeen kanssa höyryvoimalaitoksen kattilassa polttoaineena. Ennen päätymistä polttoainekentälle puruliete saostetaan ja tiivistetään jätevesilaitoksen primäärilietetasemalla, jonka jälkeen purulietteen kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin 25,0 %.

Kappaleessa 12 käytiin läpi rejektin koostumusta ja siitä saatavaa tehollista lämpöarvoa, joka oli purulietettä vastaavassa kuiva-ainepitoisuudessa 2,70 MJ/kg. Tehollinen lämpöarvo on näin ollen positiivinen, mikä tarkoittaa rejektin soveltuvan poltettavaksi. Hyö-

dynnetäessä kolmannen portaan lajitinta rejektiä syntyy keskimäärin 1,0 l/s, jonka sakeus vaihtelee 1,0 ja 2,0 % välillä. Sakeusvaihtelu huomioiden absoluuttisen kuivaa rejektiä syntyy vuodessa 300 – 600 tn. Rejektin positiivinen tehollinen lämpöarvo mahdollistaa metsähakkeen osittaisen korvaamisen rejektillä, mikä on eduksi hyödyntää rejekti polttoaineena.

14.2.1 Massa- ja vesitase

Rejektin poistamisen osalta on myös perehdyttävä kartonkikoneen vesi- ja massataseisiin, jotta saataisiin selkeä kuva, mitä poistuu prosessissa ja miten poistuma korvataan, jotta kartonkikoneen tuotanto ei kärsisi. Tarkastelun pääkohteena on kolmannen lajitteluvaiheen rejektin kulku pois massa- ja vesikierrosta, joka tapahtuu sellutehtaan kaarisihdillä. Kaarisihdin tarkoituksena on saostaa purulietettä, jolloin vesi läpäisee sihdin takaisin vesikiertoon ja saostunut puruliete ohjataan lieteasemalla lisäsaostumista varten.

Tarkastelua varten oletetaan, että rejektin sisältämä vesi seuloutuu kaarisihdillä 100 % takaisin nollavesikiertoon, joka samalla tarkoittaa, että 100 % kuiva rejektimassa seuloutuu purulietteen joukkoon. Edellä mainittu oletamus on melko pitävä, koska kaarisihdin normaalissa toiminnassa sen läpi kulkee 100-kertainen purulietemäärä rejektimäärään nähden. Lisäksi kyseinen oletus helpottaa muiden laskujen suorittamista.

Ottaen huomioon edellä mainitun oletuksen ja tarkasteltaessa vesitasetta sellutehtaan kaarisihdin ja kartonkikoneen lyhyen kierron osalta voidaan todeta, että vesitase pysyy muuttumattomana rejektin poistamisen yhteydessä. Massataseen tarkastelussa huomataan, että massakierrosta poistetaan absoluuttisesti kuivaa massaa 0,01 – 0,02 l/s riippuen rejektin sakeusolosuhteista, mikä todettiin myös aikaisemmin tehollisen lämpöarvon tarkastelussa. Tasetarkastelun perusteella voidaan kuituhäviölle laskea kustannus, joka täytyy huomioida negatiivisena arvona mahdollisessa investointilaskelmassa.

14.2.2 Tehtaan muut toiminnot

Kolmannen lajitteluportaan koeajojen aikana tarkasteltiin vesi- ja massataseiden lisäksi sellutehtaan purulietelinjan sekä jätevesilaitoksen primäärilietegaseman toimintaa. Purulietelinja sekä primäärilieteasema toimivat normaalisti koeajojen aikana, mikä viittaa, ettei purulietteen määrän kasvattamisella ollut merkittäviä vaikutuksia tehtaan muihin toimintoihin. Edellä mainittujen pohdintojen ja teknisten selvitysten perusteella voidaan ehdottaa rejektin hyötykäyttöä polttoprosessissa.

Rejektin lämmitystehosta riippuen voidaan osa sivupolttoaineena käytettävän metsähakkeen annostelua vähentää, mikä vähentää energiantuotannon polttoainekustannuksia. Tarkastelussa on päädytty käyttämään metsähakkeen kustannusarviota, sillä muiden polttoaineiden käytöstä jouduttaisiin tekemään erilliset vero- ja päästölaskelmat polttoainekustannuksille.

14.3 Muut käyttökohteet

Rejektin muita käyttökohteita ovat uudelleenkeittäminen sekä täyttömaaksi sijoittaminen. Uudelleenkeittäminen todistettiin kappaleessa 12 huonoksi vaihtoehdoksi, koska rejektin sisältämät muovit aiheuttaisivat laitteisto- ja prosessiongelmia. Lisäksi eräiden epäpuhtauksien, kuten kuoren, kiven, hiekan, jne., uudelleenkeitosta ei ole hyötyä vaan enemmänkin haittaa.

Rejektin sijoittaminen täyttömaaksi on myös huono vaihtoehto, vaikkakin suuri osa on biologisesti hajoavaa tuotetta. Täyttömaa muodostaa tehtaallemme kustannuksen, mikä johtuu 1990- ja 2000-luvulla tiukentuneista ympäristösäännöksistä. Edellä mainitusta syystä johtuen, rejektin päätymistä täyttömaaksi ei tämän diplomityön puitteissa selvitetty, koska työssä oletettiin, että kaikki rejektissä virtaava aines ohjataan purulietteen ohella polttoon.

14.4 Yhteenveto

Edellä mainituista käyttökohteista ainoastaan rejektin uudelleenkierrättäminen ja polttoprosessissa hyödyntäminen ovat menetelminä hyväksyttäviä. Uudelleenkierrätys minimoi kuituhäviöt, mutta samalla se aiheuttaa ongelmia lopputuotteen lujuusominaisuuksille. Rejektin poistaminen massakierrosta on teknisesti mahdollinen vaihtoehto, jossa rejektin tuottama lämpöarvo voidaan hyödyntää höyryvoimalaitoksen energiantuotannossa. Muut Heinolan prosessille soveltuvat käyttökohteet ovat teknisesti mahdollisia, mutta eivät luo lisäarvoa ja pahimmillaan aiheuttavat laiterikkoja, jos niitä käytettäisiin.

Menetelmistä rejektin uudelleenkierrätys on tällä hetkellä hyödynnettyä Heinolan Flutingtehtaalla, koska kartonkikoneen lajitinkapasiteetti ei riitä pienentämään rejektiosuutta riittävän pienelle tasolle, jotta polttoprosessi olisi mahdollinen vaihtoehto. Edellä suoritetujen koeajojen perusteella rejektin polttaminen on teknisesti mahdollinen vaihtoehto, mutta polttoprosessin ja kolmannen lajitteluvaiheen rakentamisen ja ylläpitämisen kannattavuus tulisi varmistaa investointilaskelmalla ennen kuin tehdas tekee päätöksen kolmannelle lajitteluvaiheelle.

15 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Kokeellisen osan mittaustulosten ja tehtyjen pohdintojen perusteella on Heinolan Flutingtehtaan rejektinhallinta mahdollista suorittaa kahdella prosessimenetelmällä; rejektin uudelleenjauhamisella tai hyödyntämällä rejektiä energiantuotannossa.

Rejektin uudelleenjauhamisen todettiin jo kirjallisuusosassa olevan kohtalainen vaihtoehto, mutta varsinainen ongelma, epäpuhtauksien läsnäolo, ei poistu vaan epäpuhtaudet rikotaan pienemmiksi, jolloin ne eivät ole aivan yhtä suureksi ongelmaksi kartonginvalmistuksessa. Menetelmän etuna on kuituhäviöiden minimointi, mutta samalla kartongin ajettavuus kärsii sekä aallotuskartonki- että aaltopahvikoneilla.

Rejektin muovinlähteiden sulamistarkastelussa havaittiin selkeästi syyt, miksi rejekti ei sovellu uudelleenkeitettäväksi. Heinolan Flutingtehtaan keitto-olosuhteet ovat liian rankkoja muoveille, jolloin ne sulavat ja voivat vaurioittaa prosessilaitteita luomalla sulaneita muovikalvoja joko keitinputkissa, ruuveissa tai muissa osaprosesseissa sulamispisteen jälkeen. Näin ollen rejektin hyötykäyttömenetelmissä oli keskityttävä oikean prosessiratkaisun etsimiseen, johon liittyi myös rejektin vaivaton poistaminen massakierrosta.

Vaivattomin prosessivaihtoehto liittyi sellutehtaan purulietteen talteenottoprosessiin, jossa hakkeenpesun ja sellunkeiton aikana liukeneva puruliete otetaan talteen höyryvoimalaitosta varten. Kolmannen lajitteluvaiheen rejekti yhdistettiin purulietteen kanssa, minkä jälkeen seurattiin kaarisihdin toimintaa. Koeajojen aikana kaarisihtti toimi normaalisti, mikä varmistaa vaihtoehtoisen prosessiratkaisun olevan soveltuva rejektinhallintamenetelmä.

Myös muita rejektin poistamiseen liittyviä prosesseja mietittiin, kuten nykyisen kierrätyskuitulinjan rejektilinja, jossa kierrätyskuidun rejekti poistetaan energiantuotantoa varten. Vaihtoehto ei ole kuitenkaan optimaalisin, sillä kierrätyskuitulinjan rejektilinjan käyttöä varten vaaditaan kierrätyskuitulinjan jatkuva käynti, mikä on riippuvainen kierrätyskuituvaraston varastotilanteesta. Pienet kierrätyskuitumäärät aiheuttavat vaihtoehtoisesesta prosessiratkaisusta liian herkkätoimisen, jolloin ei saavuteta maksimaalista hyötyä rejektinhallinnan kannalta.

Kaikkien sihtikoeajojen perustana selvitettiin sihtien nykyinen toimintakyky. Rejektisihdikoeajossa pyrittiin selvittämään rejektisihdin toiminta operointiparametria muuttamalla, koska vaihtoehtoisia lajitinosia ei ollut saatavilla. Konesihtikoeajossa tyydyttiin seuraamaan konesihdeiltä tulevaa rejektivirtaa, koska prosessi ei mahdollistanut syöttö- tai ak-

septivirran ominaisuuksien seuraamista. Rejektin seuraaminen ei yksinään anna täydellistä kuvaa lajittelusta, mutta tulosten tarkastelu sallii johtopäätösten teon, kuten on havaittu rejektisihdin ja koepainelajittimen osalta. Kolmannen lajitteluportaan koeajossa pyrittiin tutkimaan mahdollisuuksia lajitella nykyistä rejektiä sekä seurata miten prosessimuutos vaikuttaisi muiden osaprosessien toimintaan. Kolmannen lajitteluvaiheen koeajot olivat merkittävimmät koeajot liittyen diplomityön tavoitteisiin, koska koeajotulosten perusteella pystyttiin vahvistamaan oletusta, että rejekti tulee poistaa prosessista uudelleenjauhamisen sijaan.

Konesihtien rakosihtikoeajoissa ilmeni vuorokauden sisällä lajittimien yhtäaikainen tukkeutuminen, minkä johdosta konesihdit jouduttiin vaihtamaan takaisin reikäsihteihin. Ongelman syyksi luokiteltiin monia vaihtoehtoja, mutta kaikkein uskottavin oli sihtien rakoleveyden pienuus. Vastaisuutta varten konesihdit tulisi ensisijaisesti avartaa, minkä jälkeen tulisi tutkia prosessiparametrien, kuten roottorin pyörintänopeuden ja massan sakeuden, muuttamista lajittimen toimintaa edistävään suuntaan.

Edellä mainittuihin johtopäätöksiin sekä lajitteluteoriaan pohjautuen suositellaan kaikkien sihtien sihtikorimallin vaihtoa kiilalankasihtikoreihin. Jokaisen lajittimen osalta tulee selvittää sopiva rakoleveys koeajojen perusteella. Tämän työn tulosten perusteella voidaan ehdottaa, että kolmannen lajitteluvaiheen lajittimeksi soveltuu 0,25 mm rakosihtikoria hyödyntävä painelajitin. Rejektisihdille suositellaan valitsemaan rakoleveys, joka vastaa joko konesihtien tai konesihtien ja kolmannen lajitteluvaiheen väliltä olevaa rakoleveyttä. Kyseisellä tasolla ei erottelutehokkuus heikkene, minkä lisäksi sihdin tukkeumaton toiminta on mahdollista.

Tämän diplomityön tavoitteisiin kuului selvittää mahdolliset rejektinhallintamenetelmät. Rajauksen takia työssä ei keskitytty pitkän aikavälin koeajoihin, vaan mittaukset ja seuranta suoritettiin varsin lyhyellä aikavälillä. Mikäli tehdas investoi kolmanteen lajitteluvaiheeseen, tulisi investoinnin jälkeen seurata lajittamon sekä yksittäisten lajittimien toimintaa pitkällä aikavälillä. Lisäksi suositellaan selkeiden mittapisteiden rakentamista ja lisämitta-antureiden hankintaa, joiden avulla prosessimuutoksia pystyttäisiin seuraamaan kaikista lajitinvirroista.

Kuten menetelmät -osioissa jo selvitettiin, on roskapitoisuuksien määrittäminen subjektiivisella laboratoriomittauksella menetelmänä varsin virhealtis. Menetelmän käyttöön päädyttiin, koska tehtaalla ei käytetä automaattisia analysaattoreita epäpuhtauksien määrittämistä varten. Vaikkakin menetelmän virhealttius on tunnettu, voidaan tämän työn tuloksia

ja johtopäätöksiä pitää varsin luotettavina, sillä erot reikä- ja rakosihtien erottelutehokkuudessa olivat erittäin selvät. Mikäli eroavaisuudet olisivat olleet pienemmät, olisi tuloksien ja johtopäätösten varmistamiseksi suoritettava ylimääräisiä mittauksia.

Mikäli kartonkikoneen ajettavuudessa ja lopputuotteen laadussa huomataan selkeitä muutoksia, tulisi jatkotutkimusten keskittyä laadunparantamiseen käyttämällä hyödyksi painelajittimien fraktiointipotentiaalia. Keskittymällä yksittäisen lajittimen toimintaan pystytään lajittimen toimintakyky mitoittamaan operointi- ja laiteparametrien osalta, mikä edesauttaa ymmärtämään kyseisen lajittimen toimintaa ja hahmottamaan sopivia lajittinominaisuuksia, joilla voidaan poistaa massaa heikentäviä laatutekijöitä.

Lisäksi, tässä työssä ei keskitytty seuraamaan muiden osaprosessien toimintaa, vaan pelkästään selvittämään mahdollisuudet rejektinhallintaa varten. Hyödyntämällä sellutehtaan kaarisihtiä, jätevesilaitoksen purulietelinjaa sekä voimalaitoksen höyrykattilaa on konelajittimien rejekti mahdollista poistaa aallotuskartongin massakierrosta. Jatkossa tulisi selvittää miten edellä mainitut osaprosessit toimivat pitkällä aikavälillä, aiheuttaako rejekti muutoksia laitteiden ja prosessien toiminnassa sekä muodostaako rejektin poistaminen muita ongelmia, mihin tässä työssä ei ole otettu kantaa.

16 KOKEELLISEN OSAN YHTEENVETO

Kokeellisen osan tavoitteena oli selvittää ja testata konelajittelun rejektinhallintaan liittyviä vaihtoehtoja aallotuskartongin valmistusprosessissa. Selvitysten avulla Heinolan Flutingtehdas pystyisi uudistamaan rejektinhallintaprosessia, joka mahdollistaisi vähäroskaisen aallotuskartongin valmistuksen, mikä parantaisi valmistettavan lopputuotteen ajettavuutta sekä aallotuskartonki- että aaltopahvikoneilla.

Työn kirjallisuusosion pohjalta päädyttiin selvittämään nykyisen lajittamon tilanne sekä kuinka nykyistä lajittamoa voitaisiin parantaa muuttamalla lajitin- ja operointiparametreja. Lisäksi selvitettiin kolmannen lajitteluvaiheen hyötyjä ja haittoja lajitteluprosessissa.

Kokeellisen osion aluksi rejektin koostumuksesta selvitettiin eri muovin- ja kuminlähteiden sulamislämpötilat sekä sulamiseen kestävä aika, jotta tiedettäisiin voidaanko rejektiä hyödyntää uudelleenkeittävissä prosesseissa. Heinolan Flutingtehtaan rejektin koostumus sisälsi muovinlähteitä, minkä lisäksi kaikki muovit sulivat keittoprosessia vallitsevissa olosuhteissa. Rejekti ei näin ollen soveltunut uudelleenkeittäväksi, koska muovinlähteet saattaisivat vaurioittaa keittoprosessissa käytettäviä mekaanisia laitteita.

Rejektisihdin nykyinen toiminta tarkistettiin rejektisuhteen säädöllä, missä tavoitteena oli löytää optimaalinen rejektisuhde, jolla sihdin rejektivirta sisältäisi mahdollisimman paljon epäpuhtauksia niin että sihdin toiminta ei heikentyisi. Rejektisuhdetta vaihdeltiin 5 % ja 15 % välillä. Koeajotulosten perusteella päädyttiin käyttämään 15 % rejektisuhdetta, mikä on myös sihdin normaali ajotapa. Käytettäessä alemmaa rejektisuhdetta akseptivirtaan alkoi kerääntyä roskaa, mikä saattoi johtua rejektisihdin osittaisesta tukkeutumisesta.

Konesihtien toiminta tarkastettiin rejektivirtausta säätämällä, sillä konesihdeille ei ole määrättyä rejektisuhdetta, missä kummankin konesihdin rejektivirtauksen säätäminen tapahtui 15 l/s ja 35 l/s välillä. Lisäksi konesihdit varustettiin koeajojen aikana sekä reikä- että rakosihdeillä, missä tavoitteena oli löytää optimaalinen sihtikorimalli, jolla sihtien erottelutehokkuus olisi kaikkein korkein. Konesihtikoeajojen tulosten perusteella konesihtien varustaminen rakosihtikorilla on optimaalisin menetelmä epäpuhtaiden partikkeleiden poisseulomiseksi. Myös rejektivirtauksen alentaminen edisti erottelutehokkuutta, mutta kyseinen menetelmä aiheuttaa konesihtien tukkeutumisvaaran samalla vaarantaen kartonkikoneen tuotannon. Rakosihtikorin käytöstä on suoritettava lisäselvitys optimaalisen rakoleveyden löytämiseksi, missä kartonkikoneen tuotannolle ei aiheutuisi katkosta.

Kolmannen lajitteluvaiheen koeajoissa selvitettiin mahdollisuudet nykyisen rejektivirtauksen uudelleenlajittelulle. Koeajoissa käytettiin Valmetin koepainelajitinta, joka varustettiin sekä 1,60 mm reikä- ja 0,25 mm rakosihtikorilla. Koeajojen tulosten perusteella 0,25 mm rakosihtikorilla pystytään nykyinen rejekti lajittelemaan erittäin tehokkaasti akseptin ja rejektin välille. Lisäksi Bauer-McNett fraktioiden tarkastelun perusteella voidaan todeta, että kaikkein haitallisoin fraktio, > 30 , saadaan parhaiten eroteltua hyödyntämällä 0,25 mm rakosihtikoria rejektin uudelleenlajittelussa.

Vaihtoehtoisessa prosessitarkastelussa tarkasteltiin rejektin koostumuksen ja lajitin-koeajotuloksien perusteella sopivia rejektinhallintamenetelmiä Heinolan Flutingtehtaalle. Otollisimpina vaihtoehtoina pidettiin joko nykyistä rejektin uudelleenjauhamista tai vaihtoehtoisesti rejektin poistamista polttoprosessia varten. Nykyinen lajittamo ei kykene poistamaan riittävän tehokkaasti epäpuhtaita partikkeleita omaksi, pienemmäksi massavirraksi, vaan Heinolan lajittamo tarvitsee täydentävän, kolmannen lajitinportaan, mikä lajittelee nykyisen rejektin uudemman kerran pienempään rejektivirtaan. Rejektivirran olleessa riittävän pieni on rejektin poistaminen mahdollista, ilman että kartonkikoneen tuotanto kärsisi.

Diplomityön lopuksi johtopäätösten ja jatkotutkimuskohteiden osalta todetaan, että Heinolan Flutingtehdas hyötyisi merkittävästi nykyisen rejektinhallintaprosessin muuttamisesta. Epäpuhtaat, etenkin kuutionmuotoiset, partikkelit, kuten hiekka, kuorenpalaset, jne. kyetään lajittelemaan varsin tehokkaasti rejektivirtaan rakosihtejä käyttämällä. Lisäksi rejektin hyötykäyttäminen energiantuotannon polttoprosessissa vähentää energiantuotantoa varten käytettävää metsähaketta.

LÄHDELUETTELO

- Abubakr, S.M., Scott, G.M. & Klungness, J.H., 1995. Fiber fractionation as a method of improving handsheet properties after repeated recycling. *Tappi Journal*, 78(5), s. 123-126.
- Ackermann, C., Götttsching, L. & Pakarinen, H., 2000. Papermaking potential of recycled fiber. *Papermaking Science and Technology, Book 7, Recycled Fiber and Deinking*. 1. painos. Toim. L. Götttsching & H. Pakarinen. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 359-438.
- Ahnger, A., 1995. *Stock screening and cleaning in paper making*. Proceedings of the 49th Appita Annual General Conference. Hobart, Tasmania. Appita, s. 549-554.
- Alén, R., 2000. Structure and chemical composition of wood. *Papermaking Science and Technology, Book 3, Forest Products Chemistry*. 1. painos. Toim. P. Stenius. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 12-57.
- Allison, B. & Olson, J., 2000. Optimization of Multiple Screening Stages for Fibre Length Fractionation: Two-Stage Case. *Journal of Pulp and Paper Science*, 26(3), s. 113-119.
- Anon., 1994. *Better Screening, Lower Investment*. Esite. A. Ahlstrom Corporation, Reprinted from World Paper 1/1994, 4 s.
- Atkins, M., Walmsley, M. & Weeds, Z., 2005. *Internal fibre length concentration in a pressure screen*. Proceedings of the 59th Appita Annual Conference and exhibition incorporating the 13th ISWFPC. Auckland, New Zealand. May 16-19. Appita, s. 23-30.
- Baehr, T. & Rienecker, R., 1991. *A new generation of pressure screens for stock preparation systems*. Proceedings of the TAPPI 1991 Pulping Conference. Orlando, FL. November 3-7. TAPPI Press, s. 1065-1071.
- Bennington, C. & Kerekes, R., 1996. Power requirements for pulp suspension fluidization. *Tappi Journal*, 79(2), s. 253-258.
- Bliss, T., 1992. Centrifugal cleaning. *Pulp and Paper Manufacture, Volume 6, Stock Preparation*. 3. painos. Toim. R. Hagemeyer, D. Manson & M. Kocurek. Julk. Technical Section of the Canadian Pulp and Paper Association and TAPPI. Montreal, Canada, s. 248-261.

- Bliss, T., 1992. Screening. *Pulp and Paper Manufacture, Volume 6, Stock Preparation*. 3. painos. Toim. R. Hagemeyer, D. Manson & M. Kocurek. Julk. Technical Section of the Canadian Pulp and Paper Association and TAPPI. Montreal, Canada, s. 229-247.
- Braaten, K. & Wakelin, R., 1999. Fiber length fractionation of TMP using pressure screens. *Tappi Journal*, 82(6), s. 129-135.
- Clark, J., 1983. Pulp Quality Affected By Screening and Cleaning. *Southern Pulp and Paper*, 46(11), s. 30-32.
- Corson, S., Wakelin, R. & Lloyd, M., 1996. TMP furnish development strategies, part I: Fractionation and long fibre refining. *Pulp and Paper Canada*, 97(12), s. 129-132.
- Corson, S., Wakelin, R. & Lloyd, M., 1997. TMP furnish development strategies, part II: Sheet properties. *Pulp and Paper Canada*, 98(1), s. 41-44.
- Dangeleit, M., 2005. Nimax™ - Siebkorbtechnologie und Siebkorb-service. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 133(16), s. 967-971.
- Dewan, A., 1992. *Introduction to stock preparation*. TAPPI 1992 Stock Preparation Short Course, Nashville, TN. April 8-10. TAPPI Press, s. 1-3.
- Drolet, R. & Grenier, C., 1982. Optimization of reject rates. *Pulp and Paper Canada*, 83(C), s. 67-70.
- Dulude, B. K., 1994. *Improved TMP stock screening*. Proceedings of the 80th Annual Meeting of the Technical Section of the Canadian Pulp and Paper Association. Montreal, Quebec. February 1-2. Canadian Pulp and Paper Association, s. A223-A227.
- Eck, T., Rawlings, M. & Heller, P., 1985. *Slotted pressure screening at Southeast Paper Manufacturing Company*. Proceedings of the TAPPI 1985 Pulping Conference, Hollywood, FL. November 3-7. TAPPI Press, s. 41-51.
- Ek, K.-E. & Mäkeläinen, M., 1983. Kemimekaanisen massan valmistus. *Puumassan valmistus*. 2. painos. Toim. N. Virkola. Julk. Suomen Paperi-insinöörien yhdistys r.y. Turku, s. 503-531.
- Euroopan unionin virallinen lehti, 2009. *Komission asetukset (EY) N:o 406/2009*, Luxemburg: Euroopan yhteisöjen virallisten julkaisujen toimisto.

Fredriksson, B., 1984. Evaluation of apparatus and systems for screening mechanical pulp. *Svensk Papperstidning*, 87(12), s. R94-R98.

Fredriksson, B., 1995. New HC screening technology for recycled pulps. *Paperi ja Puu*, 77(5), s. 307-313.

Gallagher, B. J., 1997. *Pressure screening*. TAPPI 1997 Improving Screening and Cleaning Efficiencies Short Course. Minneapolis, MN. June 4-6. TAPPI Press, s. 9-80.

Gooding, R. & Craig, D., 1992. The effect of slot spacing on pulp screen capacity. *Tappi Journal*, 75(2), s. 71-75.

Gooding, R. & Kerekes, R., 1989. The Motion of Fibres Near a Screen Slot. *Journal of Pulp and Paper Science*, 15(2), s. J52-J62.

Gooding, R. & Kerekes, R., 1992. Consistency changes caused by pulp screening. *Tappi Journal*, 15(11), s. 109-118.

Gooding, R., Olson, J. & Roberts, N., 2001. *Parameters for assessing fibre fractionation and their application to screen rotor effects*. Proceedings of the 2001 International Mechanical Pulping Conference. Helsinki, Finland. June 4-8. Paperi-insinöörit r.y., s. 407-424.

Guss, D. & Meier, A., 1997. *The use of fractionation filters to increase fiber yield in secondary fiber systems*. Proceedings of the TAPPI 1997 Recycling Symposium. Chicago, IL. April 14-16. TAPPI Press, s. 477-482.

Gustafsson, J. ym., 2011. Pulping. *Papermaking Science and Technology, Book 6A, Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. 2. painos. Toim. P. Fardim. Julk. Paperi ja Puu Oy. Porvoo, s. 190-381.

Haikkala, P., Robinson, D., Nerg, H. & Liimatainen, H., 1994. *Advanced screening concepts of different pressure groundwood pulps for high quality papers*. Proceedings of the TAPPI 1994 Pulping Conference. San Diego, CA. November 6-10. TAPPI Press, s. 587-593.

Halonen, L., Ljokkoi, R. & Peltonen, K., 1989. *Improved screening concepts*. Proceedings of the TAPPI 1989 Pulping Conference. Seattle, WA. October 22-25. TAPPI Press, s. 61-66.

Hammar, L.-Å. & Ottestam, C., 2001. *Separate refining of TMP rejects from screens and hydrocyclones*. Proceedings of the 2001 International Mechanical Pulping Conference, Helsinki, Finland. June 4-8. Paperi-insinöörit r.y., s. 185-189.

Hamm, U., 2000. Final fate of waste from recovered paper processing and non-recycled paper products. *Papermaking Science and Technology, Book 7, Recycled Fiber and Deinking*. 1. painos. Toim. Götttsching & H. Pakarinen. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 507-591.

Hartikainen, K., 1998. Corrugated board manufacturing. *Papermaking Science and Technology, Book 12, Paper and Paperboard Converting*. 1. painos. Toim. A. Savolainen. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 244-269.

Hautala, J. ym., 2009. Screening and cleaning. *Papermaking Science and Technology, Book 5, Mechanical Pulping*. 2. painos. Toim. B. Lönnberg. Julk. Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu Oy. Jyväskylä, s. 284-326.

Hawkes, S., 1990. Improved screen room performance and operation. *Pulp and Paper Canada*, 91(5), s. T182-T184.

Heise, O., 1988. Fine-slotted screens remove small contaminants from broke flow. *Pulp and Paper*, 62(2), s. 117-120.

Heise, O., 1990. Slotted headbox screening for fine, publication, and newsprint grades. *Tappi Journal*, 73(4), s. 165-169.

Heise, O., 1992. Screening foreign material and stickies. *Tappi Journal*, 75(2), s. 78-81.

Henricson, K., Ljokkoi, R. & Vikiö, P., 1989. Recent studies and development achievements in the PM short circulation. *Paperi ja Puu*, 71(8), s. 913-916.

Hill, J., Hoglund, H. & Johnsson, E., 1975. Evaluations of screens by optical measurements. *Tappi*, 58(10), s. 120-124.

Hill, J., Karlsson, H. & Östman, T., 1979. *Process design and control of screen-rooms*. Proceedings of the 1979 International Mechanical Pulping Conference. Toronto, Ontario. June 11-14. Canadian Pulp and Paper Association, s. 303-322.

Hooper, A., 1984. Directly connected systems: logical step in pulp screening evolution. *Pulp and Paper*, 58(7), s. 59-61.

Hourula, I., Kortela, U., Ahnger, A. & Hautala, J., 1996. *Fewer cascade connections, pumping and control loops in screening plants utilizing new technique*. Proceedings of the TAPPI 1996 Recycling Symposium. New Orleans, LA. March 3-6. TAPPI Press, s. 435-442.

Huhtinen, M. & Hotta, A., 2008. Combustion of bark. *Papermaking Science and Technology, Book 6B, Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy*. 2. painos. Toim. P. Tikka. Julk. Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu Oy. Jyväskylä, s. 196-287.

Häggblom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2000. *Kemiallinen metsäteollisuus II, Paperin ja kartongin valmistus*. 1. painos. Opetushallitus. Helsinki, 280 s.

Janes, R. L., 1992. *Fiber characteristics*. TAPPI 1992 Stock Preparation Short Course. Nashville, TN. April 8-10. TAPPI Press, s. 3-51.

Javid, S. R., 1983. Pressure screen design, application key to headbox pulsation control. *Pulp and Paper*, 57(3), s. 182-186.

Jokinen, H., Karjalainen, M., Niinimäki, J. & Ämmälä, A., 2005. *Effect of furnish quality on pressure screen performance*. Proceedings of the 59th Appita Annual Conference and exhibition incorporating the 13th ISWFPC. Auckland, New Zealand. May 16-19. Appita, s. 31-37.

Jokinen, H., Ämmälä, A., Virtanen, J., Lindroos, K. & Niinimäki, J., 2007. Pressure screen capacity - current findings on the role of wire width and height. *Tappi Journal*, 6(1), s. 3-10.

Julien Saint Amand, F. & Perrin, B., 1998. *Screening: Experimental approach and modelling*. Proceedings of the TAPPI 1998 Pulping Conference. Montreal, Quebec. October 25-29. TAPPI Press, s. 1019-1031.

Julien Saint Amand, F. & Perrin, B., 1999. *Fundamentals of screening: Effect of rotor design and fibre properties*. Proceedings of the TAPPI 1999 Pulping Conference. Orlando, FL. October 31-November 4. TAPPI Press, s. 941-955.

Julien Saint Amand, F. & Perrin, B., 2001. *Fundamental aspects of mechanical pulp screening*. Proceedings of the 2001 International Mechanical Pulping Conference. Helsinki, Finland. June 4-8. Paperi-insinöörit r.y., s. 387-406.

- Kaminski, D., 1997. *Best practices in fiber fractionation among United States recycled O.C.C. mills*. Proceedings of the TAPPI 1997 Recycling Symposium. Chicago, IL. April 14-16. TAPPI Press, s. 483-492.
- Karnis, A., 1997. Pulp fractionation by fibre characteristics. *Paperi ja Puu*, 79(7), s. 480-487.
- Karvinen, R. & Halonen, L., 1984. The effect of various factors on pressure pulsation of a screen. *Paperi ja Puu*, 66(2), s. 80-83.
- Kiviranta, A., 2000. Paperboard grades. *Papermaking Science and Technology, Book 18, Paper and Board Grades*. 1. painos. Toim. H. Paulapuro. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 55-72.
- Kloow, G., 2000. Carboxyl methyl cellulose. *Papermaking Science and Technology, Book 11, Pigment Coating and Surface Sizing of Paper*. 1. painos. Toim. E. Lehtinen. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 265-275.
- Kohrs, M., 1992. The application for fractionation technology. *Paper Technology*, 33(3), s. 10-12.
- Kraft, D. & Orender, H., 1993. Considerations for using sludge as a fuel. *Tappi Journal*, 76(3), s. 175-183.
- Krotscheck, A. W., 2006. Pulp Screening, Cleaning and Fractionation. *Handbook of Pulp*. 1. painos. Toim. H. Sixta. Julk. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, s. 561-607.
- Laakso, O. & Rintamäki, T., 2003. *Kemiallinen metsäteollisuus IV, Aaltopahvin valmistus ja jalostus*. 2. painos. Suomen Aaltopahviihdistys ry. Jyväskylä, 143 s.
- Linderoth, C., 1989. Paper mill sludge as a valuable fuel. *Tappi Journal*, 72(12), s. 139-141.
- Liukkonen, S. & Bengs, U., 2001. *Coarse fiber free TMP with a single screen*. Proceedings of the 2001 International Mechanical Pulping Conference. Helsinki, Finland. June 4-8. Paperi-insinöörit r.y., s. 191-197.
- MacLeod, M. & Kempf, A., 1977. Image analyzer counts and measures dirt in pulp and paper. *Tappi*, 60(5), s. 118-120.

- Martinez, D., Gooding, R. & Roberts, N., 1999. A force balance model of pulp screen capacity. *Tappi Journal*, 82(4), s. 181-187.
- Moller, K., de Ruvo, B. & Felsvang, K., 1979. Screening, cleaning and fractionation with an atomiser. *Paper Technology and Industry*, 20(4), s. 110-114.
- Mäkinen, T., 2014. Kehityssinööri. Stora Enso Packaging Oy. Hennalankatu 270, FI-15700 Lahti, Suomi. Haastattelu 13.6.2014.
- Nelson, G. L., 1981. The screening quotient, a better index for screening performance. *Tappi*, 64(5), s. 133-134.
- Nguyen, K., Eagle, A. & van Klaveren, M., 1991. Analysis and optimization of a pulp screening system. *Appita Journal*, 44(5), s. 337-338.
- Niinimäki, J., Dahl, O., Hautala, J. & Kuopanportti, H., 1999. Effect of the pressure difference over the screen basket on the performance of a pressure screen. *Tappi Journal*, 82(4), s. 176-180.
- Niinimäki, J., Dahl, O., Hautala, J., Tirri, T. & Kuopanportti, H., 1996. Effect of feed construction on the efficiency of pressure screening. *Tappi Journal*, 79(11), s. 119-123.
- Niinimäki, J., Dahl, O., Hautala, J., Tirri, T. & Kuopanportti, H., 1996. *Effect of operating parameters and rotor body shape on flow conditions and the performance of a pressure screen*. Proceedings of the TAPPI 1996 Pulping Conference, Nashville, TN. October 27-31. TAPPI Press, s. 761-766.
- Niinimäki, J., Dahl, O., Kuopanportti, H. & Ämmälä, A., 1998. A comparison of pressure screen baskets with slot widths and profile heights. *Paperi ja Puu*, 80(8), s. 601-605.
- Ochoa de Alda, J. A., 2008. Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. *Resource, Conservation and Recycling*, 52(7), s. 965-972.
- Olson, J. A., 2001. Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening, Slotted Screen Plates. *Journal of Pulp and Paper Science*, 27(8), s. 255-261.
- Olson, J., Allison, B. & Roberts, N., 2000. Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Smooth-Hole Screen Plates. *Journal of Pulp and Paper Science*, 26(1), s. 12-16.

- Olson, J., Roberts, N., Allison, B. & Gooding, R., 1998. Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. *Journal of Pulp and Paper Science*, 24(12), s. 393-397.
- Olson, J., Turcotte, S. & Gooding, R., 2004. Determination of power requirements for solid core pulp screen rotors. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 19(2), s. 213-217.
- Ouellet, D. ym., 2003. Comparison of slotted screen and hydrocyclone fractionation systems for the manufacture of newsprint TMP. *Pulp and Paper Canada*, 104(12), s. T282-T299.
- Paul, T., Chen, D., Duffy, G. & Walmsley, M., 1999. *Improved screening performance with viscous media*. Proceedings of the 53rd Appita Annual General Conference. Rotorua, New Zealand. Appita, s. 821-824.
- Pemble, G., 1987. *Brown stock screening - a new approach*. Proceedings of the TAPPI 1987 Pulping Conference, Washington, DC. November 1-5. TAPPI Press, s. 7-11.
- Pinon, V., Gooding, R. & Olson, J., 2003. Measurements of pressure pulses from a solid core screen rotor. *Tappi Journal*, 2(10), s. 9-12.
- Putz, H.-J., 1999. Properties of recycled pulps. *Papermaking Science and Technology, Book 17, Pulp and Paper Testing*. 1. painos. Toim. J. Levlin & L. Söderhjelm. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 65-93.
- Schabel, S., 1998. Lässt sich die sortierung von Stickies noch weiter verbessern?. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 126(21), s. 1098-1102.
- Schabel, S. & Respondek, P., 1997. Sortierung - ein Werkzeug zur Sticky-Entfernung: Grundlagen. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 125(16), s. 736-739.
- Seppälä, M. ym., 2002. *Kemiallinen metsäteollisuus I, Paperimassan valmistus*. 2. painos. Opetushallitus. Saarijärvi, 196 s.
- Stevens, W. V., 1992. Refining. *Pulp and Paper Manufacture, Volume 6. Stock Preparation*. 3. painos. Toim. R. Hagemeyer, D. Manson & M. Kocurek. Julk. Technical Section of the Canadian Pulp and Paper Association and TAPPI. Montreal, Canada, s. 187-219.

Stolt, J., 2014. Tekninen asiakaspalveluinsinööri. Heinola Fluting Mill, Stora Enso Oyj. Tampellantie 1, FI-18101 Heinola, Suomi. Haastattelu 17.3.2014.

Tervola, P. ym., 2011. Washing, screening and cleaning of pulp. *Papermaking Science and Technology, Book 6A, Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. 2. painos. Toim. P. Fardim. Julk. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. Porvoo, s. 384-456.

Tilastokeskus, 2014. *Tilasto: Energian hinnat*. [verkkojulkaisu]. Tilastokeskus. Helsinki. Päivitetty: 18.9.2014 [viitattu 13.8.2014]. Saatavissa: ISSN 1799-7984, <http://www.tilastokeskus.fi/til/ehi/index.html>

Wakelin, R. & Corson, S., 1995. *TMP long fibre fractionation with pressure screens*. Proceedings of the 1995 International Mechanical Pulping Conference. Ottawa, Ontario. June 12-15. Canadian Pulp and Paper Association, s. 257-265.

Wakelin, R. & Corson, S., 1998. Reject thickening behaviour of TMP screening. *Pulp and Paper Canada*, 99(1), s. 27-30.

Walmsley, M. & Weeds, Z., 2003. *Mechanisms of pressure screening - Part 1: Mechanistic changes occurring with feed concentration and rotor type*. Proceedings of the 57th Appita Annual Conference and exhibition. Melbourne, Australia. May 5-7. Appita, s. 359-367.

Weckroth, R., Rintamäki, J., Tuomela, P. & Gooding, R., 2001. Recent developments in papermachine headbox screening. *Paperi ja Puu*, 83(6), s. 462-467.

Weise, U., Terho, J. & Paulapuro, H., 2000. Stock and water systems of the paper machine. *Papermaking Science and Technology, Book 8, Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End*. 1. painos. Toim. H. Paulapuro. Julk. Fapet Oy. Jyväskylä, s. 125-190.

Yu, C. & DeFoe, R., 1994. Fundamental study of screening hydraulics, Part 1: Flow patterns at the feed-side of the surface of screen baskets; mechanisms of fiber-mat formation and remixing. *Tappi Journal*, 77(8), s. 219-226.

Yu, C., DeFoe, R. & Crossley, B., 1994. *Fractionation technology and its applications*. Proceedings of the TAPPI 1994 Pulping Conference. San Diego, CA. November 6-10. TAPPI Press, s. 451-466.

LIITTEET

Liite 1. Vertailukuvat rejektin sulatuskoeajoista

Liite 2. Rejektinäytteiden kalorimetriset lämpöarvot

Liite 3. Esikoeajojen massaominaisuudet

Liite 4. Rejektisihdin koeajotulokset

Liite 5. Konesihtien koeajotulokset

Liite 6. Kolmannen lajitteluvaiheen koeajotulokset

Liite 1. Vertailukuvat rejektin sulatuskoeajoista

1/2

Alla kuvapareja, joissa nähdään sulatuskoeajoissa sulatettuja esineitä sekä ennen että jälkeen sulatuksen. Kuvista ilmenee, että kumimaiset palat kestävät keittoprosessin olosuhteita muovipalasten sulaessa.

Ennen

Jälkeen

Ulkoharjan lankoja, kertakäyttöiset korvatulpat ja haravan pala.



Kuivatusviiran lankoja, ”mällinpurkukepin” suojakalvo ja kuivatusviiran pala.



Päänvientinarua, ”kottikepin” kuminen työntöpää ja päänvientinarua.



Liite 1. Vertailukuvat rejektin sulatuskoeajoista

2/2

Lisää kuvapareja sulatuskoeajoista.

Ennen

Jälkeen

Keränvaihtonauhaa, öljynimeytysmattoa ja hylsyteipin taustapaperia.



Suojalasit ja viiltosuojakäsineet.



”Kottikepin” varren pala ja lusan pala.



Liite 2. Rejektinäytteiden kalorimetriset lämpöarvot

Kuvassa 45 esitetään koepainelajittimen rejektinäytteiden kalorimetrisen analysoinnin tulokset. Rejekti 1 viittaa 1,60 mm reikäsihdiltä otettuun rejektinäytteeseen ja rejekti 2 viittaa 0,25 mm rakosihdiltä otettuun rejektinäytteeseen. Rejektinäytteet on suodatettu ja kuivatettu kalorimetrianalyysiä varten, minkä johdosta näytteiden kuiva-ainepitoisuudet ovat melkein 100 %. Todellisuudessa rejektinäytteiden sakeudet olivat 1,059 % rejektinäyte 1:lle ja 1,832 % rejektinäyte 2:lle.

Labtium Oy		9.10.2014		120713	
Stora Enso Oyj/Heinola Rasmus Kiihamäki					
				Rejekti 1	Rejekti 2
Kuiva-aine		%	SCAN-N 22:77	98,4	96,8
Kuiva-aineen					
hiili	C	%	ASTM D 5373	48,5	48,0
vety	H	%	ASTM D 5373	6,2	6,1
typpi	N	%	ASTM D 5374	0,2	0,1
kalorimetrinen lämpöarvo		MJ/kg	Autom. kalorimetri	19,27	19,46
tehollinen lämpöarvo		MJ/kg		17,92	18,13
Näytteen tehollinen lämpöarvo		MJ/kg		17,60	17,47
Analysointiaika: 1. - 8.10.2014 Hyv. 9.10.2014/Jorma Torniainen					

Kuva 45. Labtium Oy:n rejektinäytteiden kalorimetrianalyysin tulokset.

Liite 3. Esikoeajojen massaominaisuudet

Taulukko 1. Esikoeajojen massaominaisuudet rejektisihdin syöttö- ja rejektivirrälle.

Esikoeajot, 26.2.2014		
Imatran tutkimuskeskus		
Rejektisihti		
	Syöttö	Rejekti
Sakeus	1,34 %	1,43 %
Kuitufraktiot	Syöttö	Rejekti
> 30	13,10 %	15,02 %
30 - 50	15,91 %	21,85 %
50 - 100	13,78 %	19,66 %
100 - 200	0,07 %	0,82 %
200 <	57,14 %	42,65 %

Liite 4. Rejektisihdin koeajotulokset

1/3

Taulukko 1. Rejektisihdikoeajojen massaominaisuudet rejektisihdin syöttö-, aksepti ja rejektivirtauksille käytettäessä joko 15 % tai 5 % rejehtisuhdetta.

Rejektisihdin koeajot; sakeus & CSF

Reikäsihti - syöttö (RR 15%)			
Sakeus	1	2	3
Märkä	204,4	200,9	202,7
Kuiva	2,065	1,918	1,992
Sakeus	1,010 %	0,955 %	0,983 %
k.a.	0,983 %		
CSF	1	2	3
Mittaus	270,4	278,7	274,6
Lämpökorjaus	-20	-21	-21
Tulos	250	260	255
k.a.	255		

Reikäsihti - aksepti (RR 15 %)			
Sakeus	1	2	3
Märkä	200,1	214,6	207,4
Kuiva	1,974	2,134	2,054
Sakeus	0,987 %	0,994 %	0,990 %
k.a.	0,990 %		
CSF	1	2	3
Mittaus	268,1	274,1	271,1
Lämpökorjaus	-20	-20	-20
Tulos	250	255	250
k.a.	250		

Reikäsihti - rejekti (RR 15 %)			
Sakeus	1	2	3
Märkä	216,5	205,0	210,8
Kuiva	2,162	1,999	2,081
Sakeus	0,999 %	0,975 %	0,987 %
k.a.	0,987 %		
CSF	1	2	3
Mittaus	279,5	286,9	283,2
Lämpökorjaus	-21	-21	-21
Tulos	260	265	260
k.a.	260		

Reikäsihti - syöttö (RR 5 %)			
Sakeus	1	2	3
Märkä	208,6	213,2	211,6
Kuiva	2,190	2,238	2,278
Sakeus	1,050 %	1,050 %	1,077 %
k.a.	1,059 %		
CSF	1	2	3
Mittaus	286,9	258,7	292,9
Lämpökorjaus	-21	-20	-21
Tulos	265	240	270
k.a.	260		

Reikäsihti - aksepti (RR 5 %)			
Sakeus	1	2	3
Märkä	201,6	210,2	226,8
Kuiva	2,113	2,213	2,440
Sakeus	1,048 %	1,053 %	1,076 %
k.a.	1,059 %		
CSF	1	2	3
Mittaus	270,4	275,8	292,4
Lämpökorjaus	-20	-21	-21
Tulos	250	255	270
k.a.	260		

Reikäsihti - rejekti (RR 5 %)			
Sakeus	1	2	3
Märkä	212,4	253,0	222,9
Kuiva	2,344	2,765	2,386
Sakeus	1,104 %	1,093 %	1,070 %
k.a.	1,089 %		
CSF	1	2	3
Mittaus	300,1	294,4	297,3
Lämpökorjaus	-21	-21	-21
Tulos	280	275	275
k.a.	275		

Taulukko 2. Rejektisihdikoeajojen Bauer-McNett fraktiot rejektisihdin syöttö-, aksepti ja rejektivirtauksille käytettäessä joko 15 % tai 5 % rejehtisuhdetta.

Rejektisihdin koeajot; Bauer-McNett fraktiointi				
Fraktio	Rejehtisuhde	Syöttö	Aksepti	Rejekti
> 30	15 %	4,01 %	4,28 %	3,09 %
	5 %	3,11 %	3,87 %	3,98 %
30 - 50	15 %	39,10 %	42,86 %	33,93 %
	5 %	41,23 %	38,76 %	37,12 %
50 - 100	15 %	13,41 %	19,04 %	13,30 %
	5 %	14,13 %	13,09 %	14,62 %
100 - 200	15 %	3,68 %	3,62 %	4,84 %
	5 %	4,39 %	4,17 %	5,76 %
200 <	15 %	39,80 %	30,20 %	44,84 %
	5 %	37,14 %	40,11 %	38,52 %

Liite 4. Rejektisihdin koeajotulokset

2/3

Taulukko 3. Rejektisihdikoeajojen roskapitoisuudet rejektisihdin syöttö-, aksepti ja rejektivirtauksille käytettäessä joko 15 % tai 5 % rejektisuhdetta.

Rejektisihdin koeajot; roskapitoisuus								
Reikäsihti - syöttö (RR 15 %)			Reikäsihti - aksepti (RR 15 %)			Reikäsihti - rejekti (RR 15 %)		
Arkki	Roskat (kpl)	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat (kpl)	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat (kpl)	Roskat (kpl/m2)
1	136	4928	1	138	5000	1	162	5870
2	131	4746	2	147	5326	2	144	5217
3	133	4819	3	135	4891	3	137	4964
4	156	5652	4	116	4203	4	170	6159
5	126	4565	5	125	4529	5	149	5399
6	150	5435	6	114	4130	6	179	6486
7	146	5290	7	134	4855	7	158	5725
8	166	6014	8	129	4674	8	169	6123
9	152	5507	9	122	4420	9	169	6123
10	147	5326	10	135	4891	10	167	6051
k.a.	144,30	5228,26	k.a.	129,50	4692,03	k.a.	160,40	5811,59
varianssi	157,57	206845,55	varianssi	106,50	139807,81	varianssi	176,04	231102,24
keskihajonta	12,55	454,80	keskihajonta	10,32	373,91	keskihajonta	13,27	480,73
95 % luottamusväli	7,78	281,88	95 % luottamusväli	6,40	231,75	95 % luottamusväli	8,22	297,95

Reikäsihti - syöttö (RR 5 %)			Reikäsihti - aksepti (RR 5 %)			Reikäsihti - rejekti (RR 5 %)		
Arkki	Roskat (kpl)	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat (kpl)	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat (kpl)	Roskat (kpl/m2)
1	162	5870	1	149	5399	1	190	6884
2	135	4891	2	139	5036	2	147	5326
3	144	5217	3	143	5181	3	143	5181
4	142	5145	4	165	5978	4	156	5652
5	133	4819	5	169	6123	5	193	6993
6	157	5688	6	171	6196	6	189	6848
7	155	5616	7	180	6522	7	177	6413
8	177	6413	8	189	6848	8	146	5290
9	168	6087	9	167	6051	9	185	6703
10	141	5109	10	151	5471	10	185	6703
k.a.	151,40	5485,51	k.a.	162,30	5880,43	k.a.	171,10	6199,28
varianssi	216,27	283903,94	varianssi	266,23	349497,65	varianssi	422,99	555278,42
keskihajonta	14,71	532,83	keskihajonta	16,32	591,18	keskihajonta	20,57	745,17
95 % luottamusväli	9,11	330,24	95 % luottamusväli	10,11	366,41	95 % luottamusväli	12,75	461,85

Liite 4. Rejektisihdin koeajotulokset**3/3**

Taulukko 4. Yksisuuntaiset varianssianalyysit rejektisihdin syöttö-, aksepti- ja rejektivirtauksille käytettäessä rejektisuhdetta muuttujana.

Yksisuuntainen varianssianalyysi: rejektisihti, syöttö						
SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
15 % rejektisuhde	10	52282,6087	5228,26087	206845,5507		
5 % rejektisuhde	10	54855,07246	5485,507246	283903,9417		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	330878,4919	1	330878,4919	1,348461881	0,260715708	4,413873419
Within Groups	4416745,432	18	245374,7462			
Total	4747623,924	19				
Yksisuuntainen varianssianalyysi: rejektisihti, aksepti						
SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
15 % rejektisuhde	10	46920,28986	4692,028986	139807,8135		
5 % rejektisuhde	10	58804,34783	5880,434783	349497,6546		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	7061541,693	1	7061541,693	28,86353067	4,17592E-05	4,413873419
Within Groups	4403749,212	18	244652,734			
Total	11465290,91	19				
Yksisuuntainen varianssianalyysi: rejektisihti, rejekti						
SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
15 % rejektisuhde	10	58115,94203	5811,594203	231102,2428		
5 % rejektisuhde	10	61992,75362	6199,275362	555278,4196		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	751483,4068	1	751483,4068	1,911245896	0,183738981	4,413873419
Within Groups	7077425,961	18	393190,3312			
Total	7828909,368	19				

Liite 5. Konesihtien koeajotulokset

1/4

Taulukko 1. Konesihtikoeajojen massaominaisuudet KS3:n ja KS4:n rejektivirtaukselle muuttuvalla rejektivirtauksella käytettäessä joko reikä- tai rakokoria.

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Reikäsihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	35 l/s			35 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	204,9	220,1	215,8	199,9	212,3	219,0
Kuiva	2,284	2,545	2,416	2,347	2,486	2,616
Sakeus	1,115 %	1,156 %	1,120 %	1,174 %	1,171 %	1,195 %
k.a.	1,130 %			1,180 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	275	292	288	293	304	311
Lämpökorjaus	-20	-21	-21	-21	-21	-21
Tulos	255	270	265	270	285	290
k.a.	265			280		

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Reikäsihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	35 l/s			15 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	199,3	198,5	205,6	198,5	205,6	207,3
Kuiva	2,234	2,249	2,318	2,304	2,477	2,499
Sakeus	1,121 %	1,133 %	1,127 %	1,161 %	1,205 %	1,205 %
k.a.	1,127 %			1,190 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	285	284	292	300	304	311
Lämpökorjaus	-21	-21	-21	-21	-21	-21
Tulos	265	265	270	280	285	290
k.a.	265			285		

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Rakosihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	35 l/s			35 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	224,2	251,2	252,1	210,7	242,9	204,5
Kuiva	3,085	3,449	3,487	2,925	3,383	2,855
Sakeus	1,376 %	1,373 %	1,383 %	1,388 %	1,393 %	1,396 %
k.a.	1,377 %			1,392 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	378	382	370	376	387	393
Lämpökorjaus	-18	-22	-18	-22	-23	-23
Tulos	360	360	350	355	365	370
k.a.	355			365		

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Rakosihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	35 l/s			15 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	216,0	226,6	237,6	270,0	235,6	202,4
Kuiva	3,026	3,229	3,353	4,136	3,505	3,056
Sakeus	1,401 %	1,425 %	1,411 %	1,532 %	1,488 %	1,510 %
k.a.	1,412 %			1,510 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	396	395	396	430	443	458
Lämpökorjaus	-23	-23	-23	-23	-22	-22
Tulos	375	370	375	405	420	435
k.a.	375			420		

Taulukko 2. Konesihtikoeajojen massaominaisuudet KS3:n ja KS4:n rejektivirtaukselle muuttuvalla rejektivirtauksella käytettäessä joko reikä- tai rakokoria.

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Reikäsihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	15 l/s			35 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	204,6	200,6	217,4	204,4	206,3	215,3
Kuiva	2,420	2,393	2,650	2,479	2,500	2,593
Sakeus	1,183 %	1,193 %	1,219 %	1,213 %	1,212 %	1,204 %
k.a.	1,198 %			1,210 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	312	312	324	307	312	320
Lämpökorjaus	-21	-21	-21	-21	-21	-21
Tulos	290	290	305	285	290	300
k.a.	295			290		

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Reikäsihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	15 l/s			15 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	212,0	202,0	196,4	213,4	209,7	199,9
Kuiva	2,790	2,713	2,719	2,543	2,608	2,462
Sakeus	1,316 %	1,343 %	1,384 %	1,192 %	1,244 %	1,232 %
k.a.	1,348 %			1,222 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	294	296	315	312	303	301
Lämpökorjaus	-21	-21	-21	-21	-21	-21
Tulos	275	275	295	290	280	280
k.a.	280			285		

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Rakosihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	15 l/s			35 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	207,7	199,9	263,3	220,3	217,0	211,6
Kuiva	3,074	2,980	3,903	3,091	3,013	2,923
Sakeus	1,480 %	1,491 %	1,482 %	1,403 %	1,388 %	1,381 %
k.a.	1,484 %			1,391 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	441	429	447	396	381	389
Lämpökorjaus	-22	-23	-23	-23	-22	-23
Tulos	420	405	425	375	360	365
k.a.	415			365		

Koneajittimien koeajot; sakeus & CSF						
Sakeus	Rakosihti - rejekti			Konesihti 4		
	Konesihti 3			Konesihti 4		
	15 l/s			15 l/s		
	1	2	3	1	2	3
Märkä	208,6	249,5	213,2	223,2	230,9	219,5
Kuiva	2,886	3,545	2,998	3,269	3,306	3,283
Sakeus	1,384 %	1,421 %	1,406 %	1,465 %	1,432 %	1,496 %
k.a.	1,404 %			1,464 %		
CSF	1			1		
	2			2		
	3			3		
Mittaus	379	357	400	405	441	423
Lämpökorjaus	-22	-22	-23	-23	-22	-23
Tulos	355	335	375	380	420	400
k.a.	355			400		

Liite 5. Konesihtien koeajotulokset

2/4

Taulukko 3. Konesihtikoeajojen roskapitoisuudet KS3:n ja KS4:n rejektivirtaukselle muuttuvalla rejektivirtauksella käytettäessä joko reikä- tai rakokoria.

Konelajittimien koeajot; roskapitoisuus									
Reikäsihti - rejekti					Reikäsihti - rejekti				
Arkki	KS 3		KS 4		Arkki	KS 3		KS 4	
	35 l/s		35 l/s			35 l/s		15 l/s	
	Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2		Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2
1	146	5289,86	128	4637,68	1	137	4963,77	166	6014,49
2	136	4927,54	133	4818,84	2	121	4384,06	177	6413,04
3	127	4601,45	114	4130,43	3	126	4565,22	141	5108,70
4	123	4456,52	116	4202,90	4	121	4384,06	148	5362,32
5	127	4601,45	120	4347,83	5	127	4601,45	173	6268,12
6	135	4891,30	130	4710,14	6	135	4891,30	169	6123,19
7	124	4492,75	123	4456,52	7	136	4927,54	141	5108,70
8	135	4891,30	129	4673,91	8	132	4782,61	145	5253,62
9	141	5108,70	126	4565,22	9	127	4601,45	151	5471,01
10	143	5181,16	114	4130,43	10	137	4963,77	145	5253,62
k.a.	133,70	4844,20	123,30	4467,39	k.a.	129,90	4706,52	155,60	5637,68
varianssi	66,46	87239,49	48,68	63901,72	varianssi	39,88	52349,53	197,60	259399,29
keskihajonta	8,15	295,36	6,98	252,79	keskihajonta	6,31	228,80	14,06	509,31
95 % luottamusväli	5,05	183,06	4,32	156,68	95 % luottamusväli	3,91	141,81	8,71	315,67
Rakosihti - rejekti					Rakosihti - rejekti				
Arkki	KS 3		KS 4		Arkki	KS 3		KS 4	
	35 l/s		35 l/s			35 l/s		15 l/s	
	Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2		Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2
1	1064	38550,72	960	34782,61	1	876	31739,13	1696	61449,28
2	1000	36231,88	1156	41884,06	2	784	28405,80	1292	46811,59
3	936	33913,04	988	35797,10	3	824	29855,07	1584	57391,30
4	1005	36413,04	1134	41086,96	4	807	29239,13	1607	58224,64
5	1014	36739,13	1028	37246,38	5	813	29456,52	1361	49311,59
6	1001	36268,12	1057	38297,10	6	801	29021,74	1533	55543,48
7	1053	38152,17	1033	37427,54	7	798	28913,04	1619	58659,42
8	1036	37536,23	1077	39021,74	8	808	29275,36	1490	53985,51
9	1015	36775,36	995	36050,72	9	861	31195,65	1450	52536,23
10	1025	37137,68	1054	38188,41	10	812	29420,29	1456	52753,62
k.a.	1014,90	36771,74	1048,20	37978,26	k.a.	818,40	29652,17	1508,80	54666,67
varianssi	1238,77	1626190,23	3866,18	5075322,64	varianssi	819,38	1075637,70	15390,84	20204322,15
keskihajonta	35,20	1275,22	62,18	2252,85	keskihajonta	28,62	1037,13	124,06	4494,92
95 % luottamusväli	21,81	790,38	38,54	1396,30	95 % luottamusväli	17,74	642,81	76,89	2785,93

Liite 5. Konesihtien koeajotulokset

3/4

Taulukko 4. Konesihtikoeajojen roskapitoisuudet KS3:n ja KS4:n rejektivirtaukselle muuttuvalla rejektivirtauksella käytettäessä joko reikä- tai rakokoria.

Konelajittimien koeajot; roskapitoisuus									
Reikäsihti - rejekti					Reikäsihti - rejekti				
Arkki	KS 3		KS 4		Arkki	KS 3		KS 4	
	15 l/s		35 l/s			15 l/s		15 l/s	
	Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2		Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2
1	189	6847,83	135	4891,30	1	142	5144,93	147	5326,09
2	188	6811,59	119	4311,59	2	196	7101,45	172	6231,88
3	180	6521,74	131	4746,38	3	139	5036,23	189	6847,83
4	167	6050,72	124	4492,75	4	162	5869,57	183	6630,43
5	173	6268,12	128	4637,68	5	169	6123,19	181	6557,97
6	169	6123,19	122	4420,29	6	152	5507,25	174	6304,35
7	181	6557,97	128	4637,68	7	187	6775,36	176	6376,81
8	168	6086,96	122	4420,29	8	168	6086,96	154	5579,71
9	180	6521,74	131	4746,38	9	190	6884,06	160	5797,10
10	167	6050,72	131	4746,38	10	171	6195,65	178	6449,28
k.a.	176,20	6384,06	127,10	4605,07	k.a.	167,60	6072,46	171,40	6210,14
varianssi	72,62	95334,78	26,32	34554,48	varianssi	382,93	502695,51	181,82	238687,02
keskihajonta	8,52	308,76	5,13	185,89	keskihajonta	19,57	709,01	13,48	488,56
95 % luottamusväli	5,28	191,37	3,18	115,21	95 % luottamusväli	12,13	439,44	8,36	302,80

Rakosihti - rejekti					Rakosihti - rejekti				
Arkki	KS 3		KS 4		Arkki	KS 3		KS 4	
	15 l/s		35 l/s			15 l/s		15 l/s	
	Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2		Roskat	Roskat / m2	Roskat	Roskat / m2
1	1772	64202,90	1052	38115,94	1	1472	53333,33	1504	54492,75
2	1596	57826,09	940	34057,97	2	1744	63188,41	1432	51884,06
3	1832	66376,81	1108	40144,93	3	1532	55507,25	1556	56376,81
4	1649	59746,38	1080	39130,43	4	1493	54094,20	1460	52898,55
5	1636	59275,36	1069	38731,88	5	1558	56449,28	1480	53623,19
6	1704	61739,13	1016	36811,59	6	1510	54710,14	1551	56195,65
7	1828	66231,88	1001	36268,12	7	1660	60144,93	1547	56050,72
8	1735	62862,32	1062	38478,26	8	1633	59166,67	1522	55144,93
9	1606	58188,41	1100	39855,07	9	1678	60797,10	1534	55579,71
10	1770	64130,43	964	34927,54	10	1539	55760,87	1548	56086,96
k.a.	1712,80	62057,97	1039,20	37652,17	k.a.	1581,90	57315,22	1513,40	54833,33
varianssi	7760,40	10187460,62	3239,96	4253249,78	varianssi	8252,77	10833814,67	1859,38	2440897,10
keskihajonta	88,09	3191,78	56,92	2062,34	keskihajonta	90,84	3291,48	43,12	1562,34
95 % luottamusväli	54,60	1978,25	35,28	1278,23	95 % luottamusväli	56,31	2040,04	26,73	968,33

Liite 5. Konesihtien koeajotulokset

4/4

Taulukko 5. Kaksisuuntaiset varianssianalyysit konesihtikoeajojen rejektivirtauksille.

Kaksisuuntainen varianssianalyysi; konesiht 3						
SUMMARY	15 l/s	35 l/s	Total			
<i>Reikäsihti</i>						
Count	20	20	40			
Sum	124565,2174	95507,24638	220072,4638			
Average	6228,26087	4775,362319	5501,811594			
Variance	308827,7562	71109,56345	726357,7195			
<i>Rakosihti</i>						
Count	20	20	40			
Sum	1193731,884	664239,1304	1857971,014			
Average	59686,5942	33211,95652	46449,27536			
Variance	15876844,07	14618815,57	194576459,9			
<i>Total</i>						
Count	40	40				
Sum	1318297,101	759746,3768				
Average	32957,42754	18993,65942				
Variance	740652866,5	214500191,7				
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	33533895781	1	33533895781	4344,388331	8,07595E-69	3,966759784
Columns	3899736400	1	3899736400	505,2192391	2,60434E-35	3,966759784
Interaction	3130437146	1	3130437146	405,5548659	3,36312E-32	3,966759784
Within	586636342,2	76	7718899,239			
Total	41150705668	79				
Kaksisuuntainen varianssianalyysi; konesiht 4						
SUMMARY	15 l/s	35 l/s	Total			
<i>Reikäsihti</i>						
Count	20	20	40			
Sum	118478,2609	90724,63768	209202,8986			
Average	5923,913043	4536,231884	5230,072464			
Variance	322176,3451	51625,59834	675867,3571			
<i>Rakosihti</i>						
Count	20	20	40			
Sum	1095000	756304,3478	1851304,348			
Average	54750	37815,21739	46282,6087			
Variance	10733992,75	4446779,757	80930853,79			
<i>Total</i>						
Count	40	40				
Sum	1213478,261	847028,9855				
Average	30336,95652	21175,72464				
Variance	616664997,1	286163550,4				
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	33706214621	1	33706214621	8667,859023	4,44783E-80	3,966759784
Columns	1678563393	1	1678563393	431,6578119	4,50361E-33	3,966759784
Interaction	1208561817	1	1208561817	310,7926408	1,42234E-28	3,966759784
Within	295536914,5	76	3888643,612			
Total	36888876746	79				

Liite 6. Kolmannen lajitteluvaiheen koeajotulokset

1/3

Taulukko 1. Kolmannen lajitteluvaiheen massaominaisuudet koepainelajittimen syöttö-, aksepti ja rejektivirtauksille käytettäessä joko 1,60 mm reikäkoria tai 0,25 mm rakokoria.

3. lajitteluvaiheen koeajot; sakeus & CSF											
1,60 mm - syöttö				1,60 mm - aksepti				1,60 mm - rejekti			
	1	2	3	Sakeus	1	2	3	Sakeus	1	2	3
Märkä	233,1	231,6	219,7	Märkä	233,5	217,7	230,9	Märkä	228,0	243,6	235,0
Kuiva	2,295	2,246	2,140	Kuiva	2,358	2,177	2,295	Kuiva	2,416	2,582	2,486
Sakeus	0,985 %	0,970 %	0,974 %	Sakeus	1,010 %	1,000 %	0,994 %	Sakeus	1,060 %	1,060 %	1,058 %
k.a.	0,976 %			k.a.	1,001 %			k.a.	1,059 %		
CSF	1	2	3	CSF	1	2	3	CSF	1	2	3
Mittaus	259,1	263,2	280,9	Mittaus	259,3	255,4	243,9	Mittaus	287,2	304,7	286,6
Lämpökorjaus	4	4	4	Lämpökorjaus	8	8	8	Lämpökorjaus	8	8	8
Tulos	265	265	285	Tulos	265	265	250	Tulos	295	315	295
k.a.	270			k.a.	260			k.a.	300		
0,25 mm - syöttö				0,25 mm - aksepti				0,25 mm - rejekti			
Sakeus	1	2	3	Sakeus	1	2	3	Sakeus	1	2	3
Märkä	218,2	210,6	232,9	Märkä	223,9	243,1	199,9	Märkä	230,7	217,4	218,3
Kuiva	2,466	2,373	2,682	Kuiva	2,450	2,817	2,253	Kuiva	4,153	4,021	4,028
Sakeus	1,130 %	1,127 %	1,152 %	Sakeus	1,094 %	1,159 %	1,127 %	Sakeus	1,800 %	1,850 %	1,845 %
k.a.	1,136 %			k.a.	1,127 %			k.a.	1,832 %		
CSF	1	2	3	CSF	1	2	3	CSF	1	2	3
Mittaus	305,2	318,1	313,4	CSF	304,7	301,9	313,8	CSF	563,2	529,0	524,3
Lämpökorjaus	-13	-17	-13	Lämpökorjaus	-13	-13	-13	Lämpökorjaus	-12	-12	-12
Tulos	290	300	300	Tulos	290	290	300	Tulos	550	515	510
k.a.	295			k.a.	295			k.a.	525		

Liite 6. Kolmannen lajitteluvaiheen koeajotulokset

2/3

Taulukko 2. Kolmannen lajitteluvaiheen roskapitoisuudet koepainelajittimen syöttö-, aksepti ja rejektivirtauksille käytettäessä joko 1,60 mm reikäkoria tai 0,25 mm rakokoria.

3. lajitteluvaiheen koeajot; roskapitoisuus								
1,60 mm - syöttö			1,60 mm - aksepti			1,60 mm - rejekti		
Arkki	Roskat	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat	Roskat (kpl/m2)
1	220	7971,01	1	146	5289,86	1	427	15471,01
2	234	8478,26	2	165	5978,26	2	412	14927,54
3	207	7500,00	3	163	5905,80	3	401	14528,99
4	194	7028,99	4	133	4818,84	4	406	14710,14
5	197	7137,68	5	144	5217,39	5	393	14239,13
6	194	7028,99	6	158	5724,64	6	413	14963,77
7	207	7500,00	7	142	5144,93	7	395	14311,59
8	227	8224,64	8	134	4855,07	8	410	14855,07
9	205	7427,54	9	161	5833,33	9	404	14637,68
10	217	7862,32	10	145	5253,62	10	413	14963,77
k.a.	210,20	7615,94	k.a.	149,10	5402,17	k.a.	407,40	14760,87
varianssi	193,07	253448,16	varianssi	139,66	183332,75	varianssi	98,93	129874,68
keskihajonta	13,89	503,44	keskihajonta	11,82	428,17	keskihajonta	9,95	360,38
95 % luottamusväli	8,61	312,03	95 % luottamusväli	7,32	265,38	95 % luottamusväli	6,16	223,36

0,25 mm - syöttö			0,25 mm - aksepti			0,25 mm - rejekti		
Arkki	Roskat	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat	Roskat (kpl/m2)	Arkki	Roskat	Roskat (kpl/m2)
1	232	8405,80	1	69	2500,00	1	1672	60579,71
2	217	7862,32	2	61	2210,14	2	1496	54202,90
3	176	6376,81	3	54	1956,52	3	1376	49855,07
4	198	7173,91	4	57	2065,22	4	1616	58550,72
5	222	8043,48	5	62	2246,38	5	1476	53478,26
6	190	6884,06	6	67	2427,54	6	1407	50978,26
7	213	7717,39	7	66	2391,30	7	1476	53478,26
8	222	8043,48	8	63	2282,61	8	1498	54275,36
9	198	7173,91	9	61	2210,14	9	1541	55833,33
10	230	8333,33	10	59	2137,68	10	1441	52210,14
k.a.	209,80	7601,45	k.a.	61,90	2242,75	k.a.	1499,90	54344,20
varianssi	341,51	448318,51	varianssi	21,21	27844,87	varianssi	8155,43	10706040,40
keskihajonta	18,48	669,57	keskihajonta	4,61	166,87	keskihajonta	90,31	3272,01
95 % luottamusväli	11,45	414,99	95 % luottamusväli	2,85	103,42	95 % luottamusväli	55,97	2027,97

Taulukko 3. Kolmannen lajitteluvaiheen Bauer-McNett fraktiot koepainelajittimen syöttö-, aksepti ja rejektivirtauksille käytettäessä joko 1,60 mm reikäkoria tai 0,25 mm rakokoria.

3. lajitteluvaiheen koeajot; Bauer-McNett fraktiointi				
Fraktio	Sihtikori	Syöttö	Aksepti	Rejeksi
> 30	1,60 mm	6,38 %	5,96 %	8,74 %
	0,25 mm	5,45 %	4,74 %	19,19 %
30 - 50	1,60 mm	44,27 %	43,85 %	42,93 %
	0,25 mm	46,11 %	47,89 %	44,81 %
50 - 100	1,60 mm	18,24 %	18,36 %	17,29 %
	0,25 mm	18,57 %	19,08 %	10,66 %
100 - 200	1,60 mm	3,79 %	3,37 %	3,12 %
	0,25 mm	3,17 %	3,35 %	2,12 %
200 <	1,60 mm	27,33 %	28,46 %	27,93 %
	0,25 mm	26,70 %	24,95 %	23,23 %

Liite 6. Kolmannen lajitteluvaiheen koeajotulokset**3/3**

Taulukko 4. Yksisuuntaiset varianssianalyysit koepainelajittimen syöttö-, aksepti- ja rejektivirtauksille käytettäessä sihtikorimallia muuttujana.

Yksisuuntainen varianssianalyysi: 3. lajitteluvaihe, syöttö						
SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
1,60 mm reikäsihti	10	76159,42029	7615,942029	253448,1551		
0,25 mm rakosihti	10	76014,49275	7601,449275	448318,5139		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1050,199538	1	1050,199538	0,002993016	0,956973382	4,413873419
Within Groups	6315900,021	18	350883,3345			
Total	6316950,221	19				
Yksisuuntainen varianssianalyysi: 3. lajitteluvaihe, aksepti						
SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
1,60 mm reikäsihti	10	54021,73913	5402,173913	183332,7499		
0,25 mm rakosihti	10	22427,53623	2242,753623	27844,87386		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	49909682,84	1	49909682,84	472,6796519	2,26901E-14	4,413873419
Within Groups	1900598,614	18	105588,8119			
Total	51810281,45	19				
Yksisuuntainen varianssianalyysi: 3. lajitteluvaihe, rejekti						
SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
1,60 mm reikäsihti	10	147608,6957	14760,86957	129874,6762		
0,25 mm rakosihti	10	543442,029	54344,2029	10706040,4		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	7834201389	1	7834201389	1445,969507	1,19772E-18	4,413873419
Within Groups	97523235,66	18	5417957,537			
Total	7931724625	19				